

С. С. ВОЛКОВ
В. И. ГИРШ

СКЛЕИВАНИЕ И НАПЫЛЕНИЕ ПЛАСТМАСС

ДЛЯ РАБОЧЕГО ОБРАЗОВАНИЯ



С. С. ВОЛКОВ
В. И. ГИРШ

СКЛЕИВАНИЕ И НАПЫЛЕНИЕ ПЛАСТМАСС

Рекомендовано Управлением кадров и учебных заведений МХП СССР в качестве учебного пособия для подготовки и повышения квалификации рабочих на производстве и в профтехучилищах



МОСКВА
·ХИМИЯ·
1988

ББК 6П7.55
В 67
УДК 678.5.029.42+678.5.026.34

Рецензенты:
зав. кафедрой «Технология материаловедения и сварки» СЗПИ
докт. техн. наук, проф. Ю. В. Холопов;
гл. инженер з-да «Прогресс» Н. Е. Алексеев

Волков С. С., Гирш В. И.

В 67 Склеивание и напыление пластмасс.— М.: Химия, 1988.— 112 с.: ил.— (Б-чка молодого рабочего).
ISBN 5—7245—0027—2

Даны представления о механизме процесса склеивания пластмасс; приведены основные виды клеев, технология их приготовления, подготовка поверхности к склеиванию; описан контроль качества клеевых соединений. Изложены способы напыления пластмасс на различные материалы с целью защиты их от агрессивных сред и влаги, повышения износостойкости трущихся деталей и обеспечения надежной электроизоляции. Рассмотрено оборудование и приспособления для склеивания и напыления пластмасс, техника безопасности при проведении этих операций.

Для повышения квалификации рабочих, занимающихся склеиванием и напылением пластмасс; может быть полезна учащимся ПТУ.

В $\frac{2803090100-109}{050(01)-88}$ 109—88 ББК 6П7.55

Учебное издание

Волков Станислав Степанович
Гирш Валентин Иосифович

СКЛЕИВАНИЕ И НАПЫЛЕНИЕ ПЛАСТМАСС

Редактор *Л. И. Галицкая*
Художественный редактор *В. В. Бордунова*
Технический редактор *О. В. Тюрина*
Корректор *Л. В. Лазуткина*

ИБ 2298

Сдано в наб. 27.10.87. Подп. в печ. 14.05.88. Формат $60\times90^1/_{16}$. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,0. Усл. кр.-отт. 7,25. Уч.-изд. л. 7,51. Тираж 22 500 экз. Заказ 766. Цена 15 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия» 107076, Москва, Стромынка, 21, корп. 2.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

ISBN 5—7245—0027—2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные материалы применяются во всех отраслях народного хозяйства. Среди множества материалов, используемых на практике, полимерные материалы составляют особую группу. Они обладают комплексом свойств, которого нет ни у одного из материалов. Они могут использоваться как самостоятельно, так и в сочетании друг с другом и с другими материалами.

Сочетание в конструкциях разных по физико-механическим свойствам материалов требует знания этих свойств для наиболее рационального их использования и для обеспечения высокой точности и надежности создаваемых машин и технологий.

Применение пластмасс в народном хозяйстве с каждым годом неуклонно растет, поэтому непрерывно совершенствуются технологические приемы, методы, процессы, способы переработки их в изделия. Технологический процесс изготовления даже самых простых изделий из пластмасс, как правило, включает в себя операции соединения отдельных деталей или узлов изделий друг с другом. Для этого применяются сварные, резьбовые, заклепочные, клеевые и другие виды соединения. В данной книге подробно описано склеивание как один из наиболее часто используемых методов соединения пластмассовых деталей и узлов, а также соединения пластмасс с другими материалами.

Склеивание как метод получения неразъемных соединений широко используется в самых различных отраслях народного хозяйства: в строительстве, самолетостроении, космической и военной технике, производстве транспортных средств (автомобилей, вагонов), приборостроении, обувном и мебельном производстве, судостроении, при возведении гидротехнических сооружений и т. д.

С помощью клея соединяют изделия из термопластичных и из термореактивных полимерных материалов, получая прочные высококачественные соединения из однородных и разнородных материалов. Склеиваются также полимерные материалы с неполимерными, например резина с металлом, керамикой и другими материалами. Склеивание растворимых в растворителях термопластов не вызывает затруднений и осуществляется клеем из того же материала. Термореактивные пластмассы склеиваются самоотверждающимися клеями из фенолоальдегидных и полиэфирных смол. Прочность склеивания зависит от характера и качества подготовки склеиваемых поверхностей, например от их шероховатости, физической структуры (капиллярности, пористости), полярности и электрического заряда.

Чрезвычайный интерес представляет применение металлополимерных композиций как для изготовления новых деталей машин, так и для ремонта и восстановления изношенных узлов и деталей. В качестве усиливающего наполнителя в композиционных материалах используются также мелкодисперсные частицы, волокна и хлопья материалов, более прочных, чем связующие. Выбирая размеры и форму наполнителя, а также сочетание типов и процентное соотношение наполнителя и связующего, можно получать материалы с заранее заданными свойствами. В качестве полимерного связующего используются чаще всего эпоксидные компаунды. Применяются также поликапроамид, полиэтилен, акриловые, эпоксидно-акриловые композиции, а также анаэробные полимерные материалы. Наполнителями служат в основном порошки металлов с размером частиц 1—100 мкм. В некоторых случаях в качестве наполнителей используются материалы типа молотой слюды, талька, каолина. Необходимые антифрикционные свойства у металлополимерных композиций обеспечиваются добавками графита, дисульфида молибдена. Эксплуатационные характеристики металлополимерных материалов достаточно высоки: разрушающее напряжение при сжатии 80—200 МПа, адгезионная прочность 15—40 МПа, допустимая температура нагрева 383—553 К, коэффициент трения скольжения по стали 0,005—0,06, износостойкость — не ниже этого показателя для специальных антифрикционных материалов. Это позволяет применять их для изготовления и восстановления таких тяжелонагруженных узлов и деталей, как блоки цилиндров, двигатели внутреннего сгорания («залечивание» трещин в корпусе, выравнивание посадочных мест), теплообменные аппараты и т. д. Отечественной промышленностью выпускаются эпоксидные композиции типов УП-5-212, УП-5-250, УП-5-221 для изготовления, ремонта и восстановления направляющих металлорежущих станков.

В промышленности широко используются процессы проклеивания и пропитки — при изготовлении непромокаемых тканей, производстве технического картона, шин и т. д. В швейной промышленности наметилась тенденция к замене в спецодежде ниточного шва клеевым.

Интересен опыт применения клеев для временного (технологического) крепления заготовок, фиксации резьбовых элементов для предотвращения самоотвинчивания, установки на клею штифтов и т. д.

Обнадеживающие результаты получены в хирургии при склеивании биологических тканей.

Наибольшее практическое применение склеивание находит там, где необходимо соединение деталей из материалов, сильно отличающихся по структуре, химическому составу, теплофизическим, механическим и другим свойствам, когда использование традиционных методов получения соединения затруднено или совсем невозможно.

Следует ожидать, что в будущем развитие техники склеивания пойдет в следующих направлениях: расширение номенклатуры склеиваемых изделий, материалов и их сочетаний за счет применения новых клеящих композиций и в результате использования специальных технологических приемов и конструкторских решений; расширение диапазона условий эксплуатации клеевых соединений путем совершенствования клеев (повышения адгезионной и когезионной прочности клеевой пленки, сопротивления старению, усталостной прочности, долговечности, создания новых связующих при использовании достижений полимерной химии); сокращение длительности отверждения; совершенствование методики расчета клеевых соединений и прогнозирование их работы, в том числе в силовых конструкциях; автоматизация процессов склеивания, в частности с применением робототехнических комплексов.

Порошкообразные, волокнистые и пастообразные полимерные материалы можно использовать для напыления на поверхности изделий из различных материалов. Напыление пластмасс как способ повышения долговечности конструкций и сооружений, его небольшая трудоемкость и относительная несложность оборудования позволяют все более широко применять этот способ в химическом и пищевом машиностроении, строительстве, судостроении, электро- и радиотехнической промышленности и других отраслях народного хозяйства для получения тонкослойных пластмассовых покрытий и облицовок. Напыление можно производить на самые различные материалы — металлы, дерево, бетон, ткань, стекло, бумагу, керамику, гипс, пластмассу, резину. Технология напыления на каждый из этих материалов имеет свои особенности.

Напыление применяют для защиты различных материалов от коррозии, придания поверхности антифрикционных и электроизоляционных свойств, а также повышения износостойкости деталей (подшипников, вкладышей, опор, втулок и др.). Кроме того, напыление наносят с целью получения декоративных и санитарно-гигиенических покрытий.

В связи с широким использованием полимерных покрытий интенсивно разрабатываются новые полимерные материалы и композиционные составы, методы нанесения покрытий и приемы формирования полимерного слоя.

Одним из способов рационального использования свойств металлов и полимеров является изготовление изделий с тонкослойными полимерными покрытиями, наносимыми на поверхность металлов.

Применение тонкослойных покрытий позволяет при малых затратах и сравнительно простой технологии реставрировать изношенные детали, используемые в узлах трения. Одно из преимуществ покрытий из порошковых полимеров — это возможность получения покрытий практически любой толщины с самыми различными свойствами. Применение порошковых эпоксидных композиций для нанесения покрытий позволило устранить ручной труд

при выполнении этой операции и в результате получать изделия повышенной надежности. Условия труда при нанесении покрытий из порошковых полимерных материалов улучшаются благодаря отсутствию токсичных и огнеопасных растворителей. Для нанесения покрытий на листовой прокат можно использовать метод напыления. Металлические листы с напыленным слоем легко штампуются, гнутся, режутся, в результате чего получаются изделия с хорошим внешним видом.

Большое значение в технике имеют такие полуфабрикаты, как металлопласт и трубы с полимерным покрытием. Металлопласт представляет собой металлический прокат, на поверхность которого с одной или с двух сторон нанесен тонкий слой полимера. Этот материал при большой толщине защитного слоя противостоит коррозии в атмосферных условиях и в агрессивных средах.

Напыление применяется как промежуточная операция при сварке пластмасс с металлами. В этом случае сначала на поверхность металлической детали напыляют слой термопласта, а затем производят сварку ее с пластмассовой деталью через напыленный слой (преимущественно ультразвуком).

В данной книге обобщен опыт, накопленный в области технологии склеивания и нанесения полимерных покрытий методом напыления, а также создания соответствующего оборудования для нанесения покрытий из порошковых, волокнистых и пастообразных полимерных материалов.

Гл. I написана В. И. Гиршем, введение и гл. II — С. С. Волковым.

Глава I
СКЛЕИВАНИЕ ПЛАСТМАСС
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Склеиваиие — процесс получеиия иеразъемиого соедииения деталей (рис. I.1) путем введеиия в техиологический зазор между иими клея, способиого к отверждеиию (рис. I.1, *а*), или путем растворения материала в зоне коитакта заготовок с последующим соедииением склеиваемых деталей и удалеиием растворителей (рис. I.1, *б*).

Клеи представляют собой индивидуальиые вещества или смеси оргаиических, элемеитооргаиических или иеоргаиических соединений, которые обладают хорошей адгезией, высокой когезиоиной прочностью, достаточиой эластичиостью и долговечностью в условиях примеиеиия и способиы отверждаться в результате прохождения химических реакций (полимеризации, поликоидеисации, вулкаиизации), испареиия и диффузии растворителя в осиовиой материал или охлаждеиия клеящего состава; при этом образуются прочиые клеевые соедииеиия [2, 3].

В основе склеиваиия, таким образом, лежит явлеиие адгезии (прилипаиия) — способиость к взаимодействию тел из разнородных материалов с достижеиием определениого уровия прочиости сцеплеиия. С адгезией связаиы миогие техиологические процессы. Так, благодаря адгезии удерживаются на поверхиостях деталей лакокрасочные и гальваиические покрытия, типографская краска на бумаге; пузырьки воздуха прилипают к частицам руды и подиимают их иа поверхиость воды при флотации; при пропитке ткаией специальиыми составами последиие удерживаются иа осиове также в результате проявлеиия адгезиоииых сил; без адгезии было бы невозможио получеиие бетоиа, кирпича. Можио было бы привести и другие миогочислениые примеры.

Как правило, адегизиоииая прочиость меньше когезиоииой, т. е. прочиости сцеплеиия виутри тела. Но бывает, что их зиачеиия близки или даже адгезионная прочность оказывается иесколько выше. В этой связи можио говорить «о липкости», «клейкости» — способности высоковязкой жидкости или упруговязкого тела прочио удерживаться иа твердой поверхиости в виде тоикого слоя. Если состав, обладающий адгезией к твердой поверхиости, проявляет также и способиость к отверждеиию с сохраиеиием в последующем связей, возиикших в результате определеииых физических и химических процессов, то ои может служить клеем и использоваться для склеиваиия.

Использоваиие физических и химических явлеиий, лежащих в осиове склеивания, т. е. образоваиие прочиой связи клеевой композиции с поверхностью соедиияемой заготовки, дает возможиость решать и другие задачи — герметизации, ликвидации поверхиост-

ных дефектов, придания поверхности свойства липкости и т. д. В этой связи при рассмотрении склеивания следует упомянуть о герметиках, шпатлевках, невысыхающих липких составах, которые могут иметь в своей рецептуре связующие и другие компоненты, входящие в клеи [3, 4].

До недавнего времени не было принято отождествлять технику выполнения каменной кладки со склеиванием. Но применяющийся раствор — это, по существу, клей, «каменный клей» на неорганической основе. В повседневной практике к клеям привыкли относить только составы на основе полимерных органических связующих искусственного и естественного происхождения. В настоящее время разработано большое количество неорганических клеев, которые широко применяются при получении огнестойкого асбестового картона и бумаги, огнеупорных масс, ячеистого теплоизоляционного материала, искусственного камня и т. д. Неорганическими клеями склеивают кварц, стекло, сталь, графит, фарфор, фаянс, асбест и др. Рабочие температуры при эксплуатации изделий могут достигать 1923 К. Однако природа связующего неорганических клеев и процессы, лежащие в основе их отверждения, настолько специфичны, что их следует рассматривать отдельно. Здесь же будет рассмотрено склеивание только с использованием клеев на основе полимерных органических связующих.

Склеивание следует рассматривать с различных позиций: физикохимии (процессы, протекающие на границе клей — деталь), механики (обеспечение необходимых прочности и долговечности), технологии (техника получения соединения), химии полимеров (вопросы, связанные с отверждением клея), конструирования (метод формообразования и сборки).

Во многих случаях склеивание может быть единственно возможным методом получения неразъемного соединения. В разных методах получения неразъемного соединения деталей используют различные термины для обозначения соединяемых деталей и соединяющих материалов. Сварщики говорят об «основном» и «присадочном» материалах (первый — это изделие, деталь, заготовка, второй — электрод, электродная проволока). Паяльщики используют понятия «основа» и «припой». Специалисты по склеиванию употребляют термины «субстрат» или «подложка» (склеиваемый материал), а «адгезив» (клей). Поскольку в поведении

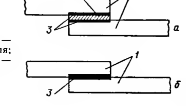


Рис. I.1. Типы клеевых швов:
а — шов, полученный с использованием клея; *б* — шов, полученный с использованием растворителя; *1* — склеиваемые заготовки; *2* — клеевая пленка; *3* — граничный слой

этих соедииеинй, в нспользуемых технологических приемах, в подходе к расчету швов и т. д. имеется миого общего, то поиятио, что при рассмотреини склеивання употребляют некоторые термниы, характериые для сварки и пайки.

В частностн, наряду с термииамн «субстрат» и «подложка» представляется допустимым использовать словосочетаиие «основной материал», «матернал детали или заготовки». В качестве снионнмов термииа «клей» используют термины «адгезив», «клеевая компознцня», «связка», хотя у каждого из иих есть свой смысловой оттенок [1].

В течение очеиь длительиого временн техинка скленвання осиовывалась на использованнн только натуральиых продуктов: однн примеиялись в естественном внде и в снлу присущей им прнродиой гнбкостн (клейкостн) ие требовали специальной глубокой переработки (бнтумиые смолы, камедь, янчиый белок, крахмал и т. п.), другне получали из растительиого н жнвотного сырья после специальиой обработки (казенн из молока, альбумии нз кровн, костиый, мездровый н рыбий клей — вываркой костей, шкур, чешуи животиых и рыб). В 1791 г. в Аиглнн был выдаи патеит иа использоваиие иатурального каучука в качестве клея. В 1800 г. иачат промышлеиный выпуск казеинового клея. Несколько позже был предложен состав для склеиваиия кожи. В 1925 г. для скленваиня было предложеио использовать жндкое стекло (растворимые силикаты).

Качественным скачком в области склеиваиия послужило появлеине искусствениых полимеров связующнх на осиове карбамндоформальдегидиой смолы (1897 г.), феиолоформальдегидиых смол (1907 г.), нитрата целлюлозы (1910 г.).

Развитне химин н механнкн полнмеров, а также области физнческой химии, посвящеииой вопросам адгезни, обеспечнло достижеиие такого уровня техиики склеивания, при котором стало возможио целеиаправлеииое влияиие иа техиологические и эксплуатацноиые характернстнки клеевых композицнй.

На 20—30-е годы приходнтся широкое производство в промышлению развнтых странах клеев на осиове сложных эфиров целлюлозы, продуктов конденсацнн глицерина с двухосиовиыми оргаиическнмн кислотамн, поливииилацетата, феиолоформальдегидиых смол. Совершеиствуются и композицни иа природиых связующих. Одиовремеино развивается техника склеиваиия — появляются плеиочиый клей, клеящие леиты. Благодаря разработке новых марок клеев стало возможиым в эти годы изготовлеиие деревяииых авнациоииых и судовых коиструкций в клеевом исполиеинн. В 1939 г. была разработаиа техиология изготовлеиия древесиостружечиых плит иа снитетических связующнх. В первой половние 40-х годов в промышлеиных масштабах начииают нспользоваться клеи иа осиове эпоксидиых смол, полиизоциаиатов, хлоропреновых каучуков, иеиасыщенных полнэфнров. Существенно расшнряется номеиклатура склеиваемых материалов. Освоеиа техиология

изготовления слоистых пластиков, соединения металлов, металлов с древесиной и т. д. [2, 3].

В последующие годы в связи с большими достижениями химии полимеров резко возросли разработка и использование в промышленности полиимидных, полисульфоновых, полибензимидазольных клеев. В 70-е годы появились клеевые составы со специальными свойствами, например анаэробные клеи, отверждающиеся даже при отсутствии контакта с воздухом.

Склеивание является сборочной операцией. Клееные конструкции должны удовлетворять конкретным требованиям эксплуатации, т. е. должны обладать необходимым для данного изделия комплексом свойств — прочностью, коррозионной стойкостью, герметичностью, электроизоляционными характеристиками, ремонтопригодностью и т. д.

На практике часто приходится решать вопрос о выборе метода сборки: применять ли склеивание, пайку, сварку, механическое крепление, методы, при которых используются пластическая деформация заготовок и крепежные элементы? Знание технологических возможностей этих методов с учетом конкретных условий производства, свойств материала, специфики конструкции позволяет находить наиболее экономичный, рациональный вариант. Поэтому, оценивая технологические возможности склеивания, необходимо помнить, что склеивание является лишь одним из возможных методов сборки. По характеру решаемых задач и организации процесса склеивание ближе всего к сварке, и особенно к пайке. Так, при пайке на поверхность детали наносят тонкие металлические слои (лужение) с целью придания изделию специальных свойств — коррозионной стойкости, способности смачиваться металлическим расплавом, электропроводности — или для устранения мелких дефектов на поверхности (например, при отделке кузовов автомобилей). Аналогично используются клеи для создания на поверхности деталей из несваривающегося материала полимерной пленки, к которой в дальнейшем привариваются пластмассовые заготовки (например, при изготовлении боковин дверей в автомобильной промышленности с использованием клея и сварки ТВЧ).

Существует способ пайко-сварки, когда кромки соединяемых элементов разделываются, как для дуговой сварки плавящимся электродом, и образующееся пространство заполняется припоем. В ряде случаев резьбовые соединения дополнительно пропаиваются для герметичности. Аналогично этому в промышленности находит широкое применение герметизация изделий с использованием полимерных композиций, обладающих клеящими свойствами, создание клеесварных конструкций, в которых клей не только обеспечивает герметичность, но и смягчает условия работы сварных точек (например, в авиационной промышленности). Существуют процессы, сочетающие в себе сварку и склеивание, разделить которые сложно, например ультразвуковая сварка пластмасс

по растворнтелям, нанесенным на соеднняемые поверхностн, сварка реактопластов, которые содержат определенный процент незаполимернзовавшейся смолы, нграющей роль связки (клея).

Много общего также в технологнн изготовлення клееных и паяных конструкцнй — в подготовке соединяемых поверхностей, в способах нанесення прнпоя и клея. Аналогнчны технологические возможностн этнх методов, характер поведения самнх соединений (распределенне рабочнх напряжений по сеченню шва, остаточные напряжения н деформацин, особенности работы на отрыв, срез и т. д.).

Такнм образом, для достнжения поставленной конструкторской целн — обеспечення прочностн, коррознонной стойкостн, герметнчностн, электропроводностн и т. д.— можно прнннмать разлнчные технологнческне решення: соедннять детали пайкой, сваркой, скленваннем, запрессовкой илн другнмн методамн [4].

Выбор метода определяется не только прнннцнпиальной возможностью получення работоспособного соедннення с заданными конструкцнонныммн характернстнками, но н экономнческнми соображеннямн. Онн определяются затратамн на проведенне основных н подготовнтельно-заключнтельных операцнй, стонмостью вспомогательных матерналов н оборудовання, затратамн энергин, зарплатой н т. д. На выбор метода соедннення снльно влняет масштаб пронзводства, стабнльность номенклатуры нзделнй, налнчне оборудовання, уровень квалнфнкацнн работающнх, степень автоматнзацнн всего пронзводства, прнрода технологнческнх операцнй, осуществляемых наряду с операцнямн соедннення деталей, н другне факторы. Так, напрнмер, прн монтаже технологнческнх трубопроводов малых днаметров нз вннипласта, когда объемы работ невелнкн, скленванне раструбных (телескопнческнх) соеднненнй в монтажных условнях может оказаться предпочтнтельнее, чем сварка горячнм газом нлн даже нагретым элементом.

По номенклатуре соеднняемых матерналов (как однородных, так н разнородных) прнннцнпиальных огранnченнй нет. Существуют матерналы, «ннертные» к клеям. По аналогнн с понятнем о плохой «сварнваемостн» в этом случае можно говорнть о плохой «скленваемостн». Но спецнальная предварнтельная обработка поверхностн, вызывающая нзмененнй структуры, фнзнческого состояння матернала в тонком поверхностном слое, позволяет решать проблему скленвання и такнх матерналов. Возможно скленванне не только разных марок конструкцнонных матерналов одного класса (металла с металлом, пластмассы с пластмассой, керамнкн с керамнкой н т. д.), но н матерналов, прннадлежащнх к разным классам (металла с пластмассой, металла с керамнкой, металла со стеклом н т. д.) [5].

Прн скленваннн разнородных полнмерных матерналов часто бывает достаточно введенне в рецептуру клея такнх двух связующнх, каждое нз которых проявляет хорошую адгезню к одному

из склеиваемых материалов; конечно, эти связующие должны легко совмещаться друг с другом.

Различие теплофизических свойств клея и материала соединяемых заготовок может привести к появлению остаточных напряжений и деформаций в результате усадки клеевой пленки при отверждении. Но и этот отрицательный эффект может быть в значительной мере снижен или даже практически устранен за счет конструкторских решений собираемого узла (в частности, уменьшения жесткости соединяемых элементов), подбора композиции клея, применения термической обработки, промежуточных проставок и другими приемами, используемыми при пайке и сварке, когда приходится соединять резко различные по своим физическим и механическим свойствам материалы.

Нет принципиальных ограничений и по виду полуфабрикатов, идущих для изготовления клееных конструкций. Кроме склеивания листов, труб и различных профилей возможно также склеивание тканей, нетканых плоских и рулонных материалов органического и неорганического происхождения с сохранением в месте шва эластичности.

При склеивании практически не существует ограничений на разнотолщинность соединяемых заготовок. Исключение составляют только те случаи, когда наблюдается интенсивное растворение основного материала клеем. Это характерно для склеивания пластмассовых деталей. В таких случаях минимальная толщина составляет около 0,15 мм, что соизмеримо с толщиной клеевой пленки в шве [4, 5].

В большинстве случаев растворение основного материала (подложки) незначительно или не наблюдается вовсе, термомеханическое воздействие на заготовки минимально, что позволяет получать достаточно высокую размерную точность изделий; поэтому склеивание можно отнести к прецизионным методам сборки.

В тех случаях, когда компоненты клея способны мигрировать в основной материал, может наблюдаться изменение свойств поверхностных слоев заготовок, контактирующих с клеем, и как результат — образование пограничного слоя с пониженными механическими свойствами в уже готовом изделии.

В подавляющем большинстве случаев склеиванием выполняют нахлесточные соединения, так как клеевой шов, подобно паяному, хорошо работает на срез и плохо — на отрыв. Но практически возможно получение любого типа клеевого соединения по плоским и фасонным поверхностям [6, 7].

Пространственное положение деталей при склеивании может быть любое. В отдельных случаях приходится учитывать повышенную жидкотекучесть клеев определенных марок. Склеивание применяется не только в цеховых, но и в монтажных условиях. Существуют специальные приемы для получения клеевых соединений в труднодоступных местах.

Прочность соединений может достигать уровня когезионной

прочности клеевой плеики или быть даже несколько выше благодаря возиикновеиию в ией сложиого иапряжеиного состояиия (эффект коитактиого упрочиеиия). На пластмассах, ткаиях и других материалах оргаиического происхождеиия возможио получеиие равиопрочиого соедииеиия (разрушеиие идет по осиовиому материалу). Галтели, образующиеся в месте перехода от детали к детали в клеевом шве, способствуют сиижеиию коицеитрации иапряжеиий, и, как следствие, соедииеиие хорошо работает иа усталостную нагрузку. Измеиеиие рецептуры клея, введеиие в него разиого рода добавок позволяет в широком диапазоне регулировать механические свойства клеевой пленки и соедииения в целом, а в ряде случаев получать композиции со специальиыми свойствами — электропроводиостью, стойкостью к нефтепродуктам, атмосферо- и биологической стойкостью и т. д.

Практически все клеи, кроме специальиых токопроводящих, в отвержденном состоянии обладают высокими диэлектрическими показателями. Получеииые соедииения герметичны. При изготовлеиии оптических систем можио получать прозрачиые швы.

Благодаря специфике самого процесса склеиваиия можно производить соедииеиия большого числа элемеитов одиовремеиио (групповая обработка); при этом практически ие ограиичивается площадь склеиваемой поверхиости, за исключеиием тех случаев, когда отверждеиие производится в специальных термошкафах, сушилках, с использоваиием сборочиых приспособлеиий (тогда размеры изделий определяются возможиостями этого оборудоваиия).

Метод склеиваиия позволяет создавать коиструкции из облегчениых элемеитов, что приводит к общему сиижеиию массы изделий. Этому способствует и малая плотиость самой связки. Наиболее ярким примером могут служить сотовые клееиые коиструкции, широко используемые в авиациоиной промышлеииости и в других областях. Сочетаиие клеевого соединеиия с коитактиой точечиой сваркой ие только обеспечивает герметичиость, ио и дает существеииый выигрыш в ресурсе работы изделия.

В то же время следует иметь в виду, что существующие клеи ие могут обеспечить одииаковую удельиую прочность с металлами, керамикой, армироваииыми пластмассами и миогими другими коиструкциоииыми материалами, используемыми для силовых конструкций. Со временем в процессе эксплуатации изделия может иаблюдаться снижеиие прочиости в результате диффузии агрессивных веществ из среды в клеевую плеику, может происходить гидролиз или выщелачиваиие компоиеитов клеевого состава, а также коррозия осиовиого материала под воздействием иепрореагировавших остатков отвердителя. Миграция иекоторых составляющих клеевой композиции к поверхиости детали или миграция пластификатора из субстрата в отверждеииый клеевой слой в случае соединеиия пластмасс может приводить к ослаблеиию уже готового соедииеиия. Вероятность таких процессов в каждом

конкретном случае будет определяться составом клея, природой материала деталей, режимом склеивания, условиями эксплуатации.

Механические свойства материала полимерной клеевой пленки могут ухудшаться в результате термо- и фотодеструкции, что вообще характерно для полимерных материалов [6].

Существенное различие коэффициентов термического линейного расширения клея и детали, усадка клея при отверждении становится причиной появления значительных остаточных напряжений и деформаций. Из-за этого при термоциклировании часто наблюдается усталостное разрушение.

Большинство клеев обладает низкой теплостойкостью (до 473—523 К). Разработанные на основе органических соединений составы, хотя и способны выдерживать кратковременно высокие температуры (до 1273 К), обладают малой пластичностью. Итервал рабочих температур для клеевых соединений составляет от —213 до +473 К (для отдельных марок клеев — от 77 до 523 К).

Нахлесточное соединение (основной тип соединения при склеивании) уже само по себе является источником концентрации напряжений из-за искажения силового поля при передаче усилия. В результате этого возникают дополнительные осложнения при работе швов, особенно при переменных нагрузках [8].

Технологический зазор между деталями составляет 0,05 — 0,15 мм, поэтому требуются достаточно точные обработка и сборка сопрягаемых поверхностей. Технологический процесс склеивания отличается длительностью, трудоемкостью подготовительных операций, повышенными требованиями к качеству обезжиривания склеиваемых поверхностей, ограниченной жизнеспособностью приготовленного клеевого состава, повышенными требованиями к технике безопасности при проведении работ, трудоемкостью ремонта клеевых соединений. При необходимости применения специальной сборочной оснастки достаточно большая продолжительность процесса обусловливает потребность в дополнительных площадях и затратах на тиражирование приспособлений. Определенные трудности вызывает автоматизация процесса склеивания.

Факторов, влияющих на качество, и в частности на прочность соединения, много. Они связаны с составом клеевой композиции, с подготовкой поверхности под склеивание, с техникой и технологией нанесения клея и сборкой, с условиями отверждения [9—11].

Не говоря о возможных ошибках в выборе клея и нарушениях технологического режима, следует отметить, что многие из этих факторов трудно поддаются контролю, нестабильны во времени, в сильной степени могут зависеть от различных обстоятельств. Так, например, свойства приготовленного клея могут изменяться в результате испарения его компонентов или протекания в нем химических реакций. Техника нанесения клея не всегда обеспечивает получение постоянной по толщине клеевой пленки. В шве

могут образовываться пустоты в виде пор из-за некачественной подготовки поверхности и наличия в клее газообразных продуктов. Качество очистки и микрогеометрия поверхиостн даже в пределах одиого изделия могут существенно различаться, и практически это трудно контролировать. Случайиые загрязиеиия из-за иеосторожиого обращения с подготовленными заготовками могут привести к браку, который выявляется только при испытании илн в процессе эксплуатации. Однородность клеевой композиции зависит от тщательности перемешивания; со временем может наблюдаться сепарация наполнителя [12].

На стадии отверждения клеевой пленки соблюдение режима ие представляет трудностей, так как он поддается объективному контролю. Параметрами режима отверждения являются температура, продолжительность процесса и величина сжимающего усилия, передаваемого на склеиваемые детали.

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Формироваие клеевого соединения в каждой точке склеиваемой поверхности складывается из следующих элементариых актов: установление физического контакта адгезива с субстратом; возиикиовение межмолекуляриых сил взаимодействия между матерналом подложки и связующим; повышеиие когезиоиной прочности адгезива. Технология и техника проведения процесса склеивания должны обеспечить условия для полного осуществления этих актов [6, 7].

Под установлением физического коитакта следует поимать сближение атомов и молекул взаимодействующих тел иа такие расстояния, когда возможно возиикиовение межмолекулярных сил или химических связей. Эти расстояния соизмеримы с межмолекулярными и межатомными расстояниями в осиовном материале и в отверждеииой клеевой композиции и составляют порядка 10^{-8} см. Образоваине физического контакта при склеивании, как и при пайке, обусловлеио явлением смачиваиия жидкостью твердой поверхности (рнс. I.2). Смачивание связано с энергетическими изменениями в системе жидкость — твердое тело. Известно, что атомы и молекулы, находящиеся иа границе раздела фаз, обладают избытком потенциальиой энергни по сравиению с теми, которые находятся виутри тела и имеют в отличие от поверхностных уравиовешеиное силовое поле. Поверхиостые атомы (молекулы) под воздействием равнодействующих сил уходят виутрь тела, а их место заиимают те, которые в даиный момент обладают бóльшим запасом эиергии. В каждый момеит времени в тоиком поверхностиом слое иаходятся атомы и молекулы, обладающие избытком эиергни. Этот избыток энергии, отнесеиный к еднннице поверхиости, представляет собой поверхностное натяжеиие. Поверхиостное иатяжеиие существует всегда — и у твердых и у жндкнх тел, когда нмеется межфазная граиица. В рас-

сматриваемой системе до момента контактирования поверхностное иатяжение существовало на граиицах жидкость — газ и твердое тело — газ. После коитактироваиия исчезают прежиие границы и появляется новая: жидкость — твердое тело. Если поверхностное натяжение на этой новой границе оказывается ниже, то процесс контактироваиия (смачиваиия) идет самопроизвольио, так как запас свободиой эиергии в системе умеиьшается. Возможиость смачивания определяется природой коитактирующих материалов [8—10].

При существовании прииципиальиой возможности смачивания адгезивом подложки положение может осложияться из-за иаличия иа поверхиости твердого тела каких-либо иииородиых веществ — загрязиеиий (масла, жиры и т. д.), сильио сиижающих поверхиостное натяжение. Чем выше поверхностная энергия склеиваемого материала, тем легче идет смачиваиие. Поэтому хорошая смачиваемость иаблюдается у металлов, керамики, стекла. Смачиваемость можио улучшить при помощи специальной обработки поверхности и путем ее активирования физическими и химическими способами.

Отсутствие смачиваиия делает иевозможиым процесс склеиваиия, а наличие несмоченных участков приводит к дефектам. Поэтому одиа из главных задач в технике склеивания — предварительное удаление загрязнений, препятствующих процессу смачивания и возиикновеиию межмолекуляриых сил взаимодействия адгезива и субстрата. При этом иеобходимо иметь в виду, что ие полиостью удаленные остатки составов, используемых в процессе удаления загрязнений (при обезжиривании, травлеиии), могут в свою очередь стать причиной нарушения необходимого контакта адгезива с подложкой («вторичиое загрязиение») [5].

Если клей имеет малую вязкость и скорость растекания его достаточио велика, равномериое распределение клея по всей соедиияемой поверхности обусловливается процессом самопроизвольиого растекания. В других случаях приходится прибегать к механическому воздействию на клей, заставляя его течь в зазоре под действием сжимающего усилия, оказываемого иа соедииямые заготовки, или используя специальную технику нанесения

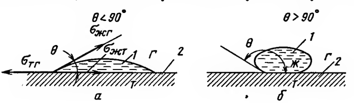


Рис. I.2. Капля жидкости (1) иа поверхиости твердого тела (2) в случае смачивающей (а) и несмачивающей (б) жидкостей:

0 — краевой угол смачнвання; σ — поверхиостное натяжение на граннце раздела фаз; г — газ, ж — жидкость, т — твердое тело

клея на поверхность и тем самым изначально обеспечивая получение достаточно равномерного по толщине слоя.

Смачивание и растекание осложняются наличием на реальных (технических) поверхностях макро- и микронеровностей, высота которых может составлять от десятых долей миллиметра до сотых долей микрометра. Этот рельеф увеличивает фактическую площадь контакта клея со склеиваемой заготовкой, что способствует повышению прочности соединения. Но при этом необходимо обеспечить максимальное заполнение рельефа клеем для создания физического контакта по всей фактической площади. Для этого клеящее вещество должно иметь высокую подвижность, жидкотекучесть, малую вязкость, что достигается применением адгезивов в виде растворов, эмульсий, расплавов.

Повышение температуры и давления способствует заполнению микрорельефа. Нанесение клеевого слоя отдельно на каждую склеиваемую поверхность упрощает задачу, так как при сборке заготовок объединение клеевых слоев не представляет трудности. Полное заполнение микрорельефа, особенно при принудительном течении клея, вряд ли возможно. Вследствие этого в месте соединения могут образовываться микропустоты (микродефекты), которые являются источниками концентрации напряжений, нарушают герметичность и могут приводить к появлению очагов коррозии [7, 13].

Попытки объяснить возникшую после смачивания и последующего отверждения связь клеевой пленки с поверхностью заготовки привели к появлению нескольких теорий адгезии. В настоящее время существуют механическая, молекулярная, химическая, диффузионная и электрическая теории адгезии. Каждая из них не противоречит остальным, но и не может в полной мере объяснить всего многообразия фактов, наблюдаемых в процессе склеивания различных материалов [3, 6].

Механическая теория представляет образование сцепления как результат заклинивания отвержденного клея в порах материала (рис. I.3) и внедрение в клеевую пленку при смачивании ворсинок, находящихся на склеиваемой поверхности. Для пористых материалов (ткани, бумага, картон, кожа, пенопласты и т. п.) такое объяснение может быть использовано, хотя далеко не является исчерпывающим [11].

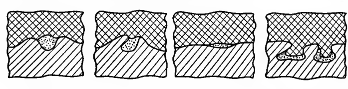


Рис. I.3. Возможные варианты заполнения клеем микрорельефа поверхности склеиваемой детали

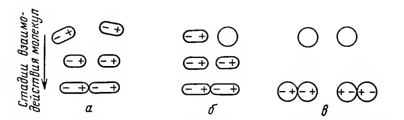


Рис. I.4 Схемы возможного взаимодействия молекул адгезива с молекулами субстрата в случае двух полярных (*а*), полярной и неполярной (*б*) и двух неполярных (*в*) молекул

Молекулярная теория объясняет возникающую связь взаимодействием молекулярных электрических диполей (рис. I.4). В случае симметричного построения молекулы дипольный момент равен нулю, как например, у полиэтилена, полипропилена, фторопласта. В этом случае мы имеем дело с неполярными полимерами. В молекулах полярных полимеров (эпоксидные, фенолоформальдегидные, полиэфирные смолы, полиамиды, полиуретаны и т. д.) положительные и отрицательные заряды смещены относительно друг друга. При взаимодействии двух полярных веществ (рис. I.4, *а*) их молекулы ведут себя как диполи, взаимно ориентируясь в пространстве так, чтобы их энергия взаимодействия была минимальной (ориентационные силы связи). При контакте полярных материалов с веществами, состоящими из неполярных молекул, последние под воздействием полярных молекул поляризуются, возникают так называемые индуцированные диполи, при этом происходит их деформирование (рис. I.4, *б*). При взаимодействии неполярных молекул появляются дисперсионные силы межмолекулярного взаимодействия (рис. I.4, *в*).

Химическая теория адгезии как главную причину возникновения связи выдвигает химическое взаимодействие между адгезивом и склеиваемой поверхностью.

Прочные клеевые соединения могут быть получены, если между адгезивом и склеиваемой поверхностью образуются химические связи — ионные или ковалентные (табл. I.1) [14]. Их прочность в 10 раз выше, чем прочность водородных связей, и в 25 раз больше, чем в случае удерживания молекул клея на поверхности склеиваемого тела за счет адсорбционных сил [2]. Межмолекулярные взаимодействия с низкими значениями энергии связи не могут обеспечить достаточно высокие показатели прочности соединения. Такие связи легко разрушаются под воздействием внешних факторов (влажность, нагрев, действие поверхностно-активных веществ и т. д.). Химические связи способны обеспечить высокую прочность и долговечность клеевых соединений.

Диффузионная теория адгезии основана на том, что адгезионные связи обусловлены диффузией макромолекул или их отдельных сегментов. Адгезия происходит за счет диффузии частей макромолекул полимера (благодаря их гибкости) через гра-

Таблица I.1. **Значения энергии связи [14]**

Тип связи	Среднее значение энергии связи, кДж/моль	Контактирующие материалы	
		адгезив	субстрат
Межмолекулярные связи:			
дисперсионные	4—8	Неполярный полимер	Неполярный полимер
деформационные	8—13	То же	Полярный полимер, полярные природные материалы (дерево, кожа и т. д.), металлы, стекло, керамика
ориентационные	13—25	Полярный полимер	То же
водородные	42—50	Полярный полимер, содержащий функциональные группы, в которых атом Н связан с электроотрицательной атомной группой (карбоксильные, гидроксильные, амидные и др.)	»
Химические связи:			
ионные	419—1047	Полимеры, содержащие карбоксильные группы	Металлы
ковалентные	251—503	Полярный полимер, содержащий реакционноспособную группу	Полимеры с реакционноспособными группами, металлы, стекло

ницу первоначального контакта. Поскольку клей обычно содержит растворитель, то его макромолекулы более подвижны, чем макромолекулы склеиваемого материала, и адгезия обеспечивается за счет диффузии молекул клея в склеиваемый материал. Если последний может набухать в растворителе клея, то происходит также диффузия макромолекул склеиваемого полимера в клей. Эти процессы происходят не на границе раздела, а в объеме и рассматриваются как явление взаиморастворимости полимеров, связанное с исчезновением границы между склеиваемыми телами. Прочность такого клеевого соединения обусловлена силами, которые действуют между переплетенными макромолекулами [2].

Электрическая теория адгезии, применяемая при изучении клеевых соединений полимеров с металлами, основана на рассмотрении процессов, сопровождающих отрыв полимерной пленки от твердой подложки. Эти процессы заключаются в возникновении на поверхности раздела двойного электрического слоя.

Знание состава адгезива и субстрата позволяет прогнозировать возможность применения тех или иных клеев для конкретного материала (табл. I.2).

Завершающий этап формирования соединения — отверждение клеевой пленки. Протекание этого процесса зависит от природы клеевой композиции. Если основу клея составляет полимер, относящийся к термопластам, то отверждение может идти главным образом в результате охлаждения клея-расплава или испарения растворителя. Материал шва сохраняет присущую всем термопластам способность к размягчению при нагреве и набуханию под действием растворителя; материал шва имеет линейную или разветвленную структуру, поэтому теплостойкость таких соединений низкая. Для необратимо отверждающихся клеевых композиций характерно образование сетчатой структуры клеевой пленки. Отверждение может происходить при нормальной температуре и при нагревании.

Процессы отверждения сопровождаются усадкой клеевой прослойки и, как следствие, появлением остаточных напряжений и деформаций. Этому способствует также разница в коэффициентах термического расширения материалов, участвующих в образовании соединения, и в определенных случаях — выделение из клеевой композиции низкомолекулярных продуктов. Уменьшение модуля упругости клеевой пленки введением в ее состав пластификаторов может способствовать снижению остаточных напряжений.

В клеевом соединении принято рассматривать шов как однородную по составу прослойку (клеевая пленка). В действительности же на границе клей — основной материал (адгезив — субстрат) могут протекать сложные физические и химические процессы. Поэтому можно говорить о существовании в общем случае на межфазной границе промежуточной зоны, состав которой неидентичен материалу в центре клеевой пленки. В этом смысле правомерно будет различать не только макронеоднородность, связанную с различием природы соединяемого материала и клея, но и микронеоднородность в пределах клеевой пленки, являющуюся следствием диффузионных процессов, растворения, образования химических соединений на границе раздела фаз. Известно, что химическая неоднородность является причиной механической неоднородности, которая определяющим образом сказывается на служебных характеристиках соединения.

Таким образом, нужно говорить не только о границе адгезив — субстрат, но и о промежуточной зоне определенной протяженности, не стабильной во времени. Механические характеристики материала этой переходной зоны, прочность ее связи с основным материалом и клеевой пленкой обусловливают долговечность соединения.

Физико-химические процессы, происходящие на границе, протекают быстрее, чем в металлических швах при сварке и пайке. Поэтому стабильность во времени свойств клеевого соединения меньше, чем сварного и паяного. Эти процессы могут идти как непосредственно во время склеивания, так и при эксплуатации

Таблица 1.2. **Оценка адгезионной способности * полимерных**

Субстрат	Адгезив				
	фенолоформальдегидные смолы	карбамидные смолы	эпоксидные смолы	полиэфиры ненасыщенные	кремнийорганические смолы
Фенопласты	х	х	от	х	х
Аминопласты	у	х	от	х	х
Полиэфиры	н	н	н	и	0
Кремнийорганические полимеры	0	0	и	н	х
Полиуретаны	от	х	х	н	0
Полиамиды	н	н	у	н	0
Полиолефины	0	0	0	0	0
Поливинилхлорид	н	н	н	и	0
Полиметилметакрилат	н	и	х	х	н
Полистирол	н	н	н	н	и
Фторопласты	0	0	0	0	0
Металлы	от	х	от	х	х
Стекло	от	х	от	от	х
Керамика	от	у	от	х	х
Дерево	от	от	от	от	н
Бумага	от	от	от	от	и
Кожа	х	и	от	и	и
Ткани	от	и	от	х	н

* 0 — отсутствие адгезии, и — низкая адгезия, у — удовлетворительная, х — хоро-

изделия. Иногда наблюдаются случаи самопроизвольного разрушения первоначально доброкачественного клеевого шва. Все это еще усугубляется склонностью полимерных материалов к старению — необратимым процессам, связанным с изменением во времени их структуры, свойств, резко усиливающимся под действием тепла, света, радиации [7].

Макронеоднородность может быть учтена при расчете соединения. Влияние микронеоднородности труднее прогнозировать, так как она зависит не только от основного материала и выбранной композиции клея, но и от техники склеивания. Так, недостаточная просушка нанесенного клеевого слоя приводит к недопустимо высокому содержанию растворителя в клеевой пленке и, как следствие, к низкому качеству шва. Избыток отвердителя может привести к коррозии основного материала и т. д. Таким образом, появляется много дополнительных, трудно учитываемых факторов.

Прочность соединения может быть снижена из-за отсутствия сплошной клеевой пленки и наличия участка, где при сплошности

	полиуретаны	полиамиды	полиолефины	фторосодержащие полимеры	поливинилхлорид	поливинилбутираль	полиметилметакрилат	полистирол
	от	х	0	0	н	н	0	н
	от	х	0	0	н	н	0	н
	н	н	0	0	н	н	0	н
	н	н	0	0	0	0	0	0
	от	х	0	0	0	н	н	н
	у	х	0	0	0	н	0	н
	0	0	от	0	0	0	0	0
	н	н	0	0	от	н	н	н
	у	у	0	0	х	у	от	у
	н	н	0	0	н	н	у	от
	0	0	0	от	0	0	0	0
	от	х	н	0	у	у	н	н
	от	х	0	0	н	х	н	н
	от	х	0	0	н	х	н	н
	х	х	н	0	н	у	у	у
	х	х	н	0	н	у	у	у
	от	х	0	0	н	н	н	н
	х	х	н	0	н	у	н	у

шая, от — отличная адгезия.

пленки все-таки не обеспечеи физический коитакт по всему микрорельефу.

При склеиваиии материалов, ие совместимых с клеем, проводят специальиую обработку поверхности субстрата с целью создания на ней прочио удерживающейся плеики иного, чем у осиовного материала, состава, с которой клей будет образовывать прочную адгезионную связь. По существу, при этом проблему склеивания сводят к соединеиию других материалов [11].

СОСТАВ И КЛАССИФИКАЦИЯ КЛЕЕВ

В настоящее время в мире выпускается около 1200 марок клеев. В большиистве своем оии имеют сложиую рецептуру, поэтому правильио было бы говорить о клеевой композиции. В общем случае ее функциональными составляющими являются: осиова клея (связующее); растворитель; компоиеиты, обеспечивающие необходимые техиологические свойства (смачиваемость, вязкость, растекаемость, адгезиоиную способиость),— активаторы; компо-

ненты, обеспечивающие протекание процесса отверждения,— отвердители, катализаторы, замедлители, ускорители, ингибиторы; компоненты, влияющие на физико-механические свойства и другие эксплуатационные характеристики самого клея и клеевой пленки в составе соединения (наполнители, модифицирующие добавки, пластификаторы, стабилизаторы и др.).

Не обязательно присутствие в рецептуре каждого клея всех этих составляющих. Нередко оказывается, что те или иные ингредиенты выполняют одновременно несколько функций. Бывает, что для отверждения необходимо только изменение внешних условий (снижение температуры, изоляция от контакта с воздухом, механическое воздействие, приводящее к механодеструкции и последующему поперечному сшиванию макромолекул, и т. п.) [5, 6, 12].

Для склеивания некоторых пластмасс используют растворители, которые сами по себе не обладают клеящими свойствами, но способны растворять тонкий слой основного материала на соединяемых поверхностях и обеспечивать тем самым после приложения сжимающего усилия в течение определенного времени получение соединения с необходимым уровнем технологической прочности. Клей в этом случае образуется в месте соединения. Поскольку растворители, как правило, достаточно жидкотекучи, то в них предварительно можно растворить гранулы или стружку соединяемого или другого материала, способного к адгезии с подложкой. При этом получается двухкомпонентный клей, который имеет бо́льшую, чем у чистого растворителя, вязкость и допускает меньшую точность совмещения склеиваемых поверхностей.

Основой клея является связующее — вещество или смесь веществ, характеризующихся высокой адгезией к склеиваемому материалу. Свойства связующего оказывают определяющее влияние на основные эксплуатационные характеристики соединения. Основа клея может быть твердой и жидкой. Если основа представляет собой жидкость, то в ней растворяются другие компоненты клея. Если основа — твердое вещество, то для обеспечения возможности склеивания требуется либо нагреть его до получения расплава, либо перевести в раствор, способный принять и другие компоненты. Растворитель не только выполняет эту роль, но и обеспечивает получение необходимой консистенции всей клеевой композиции, что важно для выбора способа нанесения равномерного слоя на склеиваемые поверхности и заполнения технологического зазора без образования подтеков при различных пространственных положениях изделия [2, 4, 11].

В качестве растворителей используются органические жидкости (толуол, ацетон, этанол, метанол, хлороформ, бензин и др.), вода и др. в зависимости от природы связующего. Раствор или расплав должен обладать способностью к смачиванию подложки и в определенных случаях — к растеканию и капиллярному течению. К моменту завершения формирования клеевого соединения и достижения эксплуатационной прочности растворитель из клее-

вой пленки в основном удален, и его содержание в ней минимально.

Если полученный раствор или расплав связующего не проявляет достаточной адгезионной способности, то в рецептуру вводят активаторы — вещества или смеси веществ с повышенной адгезией к основному материалу и клею. Эти вещества можно наносить и на поверхность заготовки. Иногда используются реакционноспособные растворители, участвующие в процессе отверждения клеевой пленки.

Для перевода связующего в твердое состояние в состав добавляют отвердители — вещества, способные к химическому взаимодействию со связующим, в результате чего образуется сетчатая структура (процесс химического отверждения).

Для ускорения процесса отверждения вводят катализаторы, которые в ходе реакции не претерпевают каких-либо химических превращений. Количественные соотношения отвердителя и связующего определяются химизмом реакции отверждения. Количество катализатора не должно быть ниже определенного критического уровня. Отвердители и катализаторы вводят только в те клеи, отверждение которых происходит в результате химических реакций [5].

С момента введения отвердителя в клеевую композицию начинается процесс отверждения клея. Чтобы успеть до завершения отверждения выполнить все технологические операции по нанесению клея и сборке заготовок, необходимо контролировать скорость этой реакции, сохранять жизнеспособность клея. Это обеспечивается применением замедлителей. Если требуется, наоборот, повысить скорость реакции отверждения, вводятся ускорители.

Для подавления нежелательных химических реакций вводят ингибиторы. В частности, такая задача может возникать при склеивании металлов с использованием кислотных или других отвердителей, способных взаимодействовать с основным материалом.

Введение различных модифицирующих добавок существенно меняет эксплуатационные и технологические свойства клеев и клеевых соединений.

Наполнители позволяют изменять механические и теплофизические характеристики клеевого шва, в частности повышать модуль упругости, прочность, увеличивать теплопроводность и т. д.; в некоторых случаях наполнитель сообщает клею электропроводность.

Добавки пластификаторов снижают хрупкость клеевой пленки.

Могут вводиться вещества, снижающие температуру реакции отверждения.

Для предотвращения или замедления старения полимерного связующего вводятся стабилизаторы, действие которых

аналогично действию стабилизаторов в пластмассах. Вводимые в клеи пигменты влияют на товарный вид изделия. Для снижения стоимости клеев в них могут добавляться разбавители [6, 9].

Главным признаком, используемым при классификации клеев, является природа связующего. По этому признаку все клеи можно разделить на два больших класса: органические и неорганические. К последним относятся растворимое стекло, цементы, полифосфаты, клеи-фритты (водные суспензии композиций, содержащих оксиды щелочных и щелочноземельных металлов) и т. д. Органические связующие делятся на естественные (животного и растительного происхождения) и синтетические. Среди синтетических связующих различают термопластичные и термореактивные. Клеи на основе термопластичных полимеров представляют собой растворы, суспензии и расплавы. К числу таких связующих относятся полиамиды, полиметилметакрилат, полистирол, поливинилацетат, полиэтилен, полиизобутилен, производные акриловых и метакриловых кислот и т. д. Эти полимерные вещества имеют большую молекулярную массу (свыше 10 000). Термореактивные связующие — фенолоформальдегидные, карбамидоформальдегидные, эпоксидные, полиуретановые, полиэфирные смолы, элементоорганические полимеры (кремнийорганические, борорганические, металлоорганические и др.). Молекулярная масса их существенно меньше, чем термопластичных полимеров (200—6000). Термореактивные клеи бывают одно-, двух- и многокомпонентные [10].

Независимо от принадлежности к термопластичным или термореактивным клеи по температуре отверждения различаются на клеи холодного (до 298 К), умеренного (298—373 К) и горячего (373—523 К) отверждения. По физическому состоянию это могут быть жидкие мономеры, растворы, суспензии, эмульсии, пленки или прутки, порошки. По функциональному назначению — конструкционные, неконструкционные и специальные. Конструкционные клеи обеспечивают прочность соединения, равную или соизмеримую с прочностью основного материала, и используются для создания силовых конструкций. Неконструкционные клеи предназначены для получения ненагруженных швов. Термином «специальные клеи» обозначают композиции, которые обладают ярко выраженными особыми свойствами, например высокой термостойкостью, электропроводностью, оптической прозрачностью, биологической инертностью (медицинские клеи). Эти клеи также должны обеспечивать определенный уровень механических свойств изделия [11].

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ

Зиаиие свойств клеевой композицин необходимо при разработке рецептуры и рекомеидаций по выбору марки клея, оценке его техиологических возможностей, получении даиных для расчетов швов, отработке технологии склеиваиия, эксперименталыюй проверке эксплуатацнонных характеристик клеевого соедниення. Орнентнроваться только иа справочные данные и заводскую документацню, поступающую вместе с клеямн, можно далеко не всегда из-за иедостаточной нх информативиостн, многоварнантностн сочетаннй склеиваемых матерналов, разнообразия условнй работы изделий, способов подготовки заготовок, режимов отверждеиия клеевой композиции, возможиых отклоиеиий от иормативов при производстве клея и его компоиеитов, существенной зависимости качества соедииеиия от субъективных факторов, а также значительиых и чаще всего трудио учнтываемых измеиеиий в клее, происходящих во время его храиеиия н траиспортирования. В связи с последиим обстоятельством особое зиачение имеет входиой коитроль для оцеики соответствия поступающего клея и его компоиеитов паспортным данным (сертнфнкату).

Все характернстикн клеевых композиций можио разделнть на техиологические н эксплуатациоиные. К *техиологическим* отиосятся вязкость, сухой остаток, содержаиие летучих веществ, жнзиеспособность, одиородиость, адгезня к скленваемым материалам н иекоторые другие; к *эксплуатационным* — прочность в различных условиях иагружения, тепло-, морозо-, водо-, атмосферостойкость, стойкость к воздействню разлнчиых химических веществ, масел, топлив, к нзменеииям температурио-влажиостных условий и т. д.

Всего нзвестио около 70 методов испытаиий. На миогие из них разработаны ГОСТы.

Вязкость клея является одиой из важиейших его характеристик. Методнка количественной оцеики вязкости завиcнт от коиснстеицни клея: маловязкая жндкость, вязкая жндкость, расплав. В первом случае используют вискознметры — прнборы, позволяющие по времеии свободиого истечения определенной дозы жидкости через калиброваииое сопло судить о вязкостн. Для более вязких клеев оценка вязкости ведется по временн прохождеиия стальиым шариком определеииого пути в жидкостн, налнтой в вертикальио стоящую стеклянную трубку; в случае клеев с достаточно высокой вязкостью — по погружеиию коиуса. Прннципиальиое зиачеиие во всех этих случаях нмеет соблюдение температурного режима. Вязкость плеиочного клея оценнвается по измеиению площадн вырезанного из него днска, сжнмаемого между обогреваемымн покрытымн слоем фторопласта металлическими пластннками при определеиных давленин, температуре и продолжнтельности. Существуют н другне методы оцеикн.

Поиятие «*жизиеспособиость*» имеет разиый смысл для реакциониоспособиых клеев н клеев, отверждающихся в результате испареиия растворителя. В первом случае жизиеспособиость определяется временем, в течеиие которого клей сохраняет коисистенцию, необходимую для нанесеиия его на заготовку; во втором — максимальиым временем, по нстеченнн которого нанесеиный иа поверхность клеевой слой еще способен соедиияться с поверхностью ответной детали. За результат оцеики жизиеспособности клея прннимается время, по истеченни которого в определеииых температурных условиях начниает пронсходить его желатинизация или отверждеиие, регистрнруемые при перемешнвании испытуемого состава стекляииой палочкой.

Сухой остаток оценнвается по результатам взвешнвания определенной порцнн клея в исходиом состояиии и после испареиия растворителя, удалеиия летучих веществ под действием тепла инфракрасиых ламп, в сушильиом шкафу, вследствие выдержки в термостате.

Оцеика качества клея *по виду и цвету* пронзводнтся с целью убеднться в отсутствии комков, геля, размешаниого и иеразмешаиного осадка, для чего после перемешивания клея его иаливают тонким слоем в прозрачиые плоские сосуды (чашкн Петрн). Внзуально илн с помощью прибора (колориметра) оценивают цвет, который может свидетельствовать о коидиции клея.

О качестве плеиочиого клея можно судить по результатам механических нспытаний плеики. Жидкие клеи с течением временн могут измеиять свою вязкость. Для вспеииеиых клеев нзмеряют кажущуюся плотиость, влияющую на механнческие свойства соединення. Кроме того, существуют и другие подходы к оценке клеев: определение кнслотиостн, содержания свободного формальдегнда, стнрола, хлора, эпокснДных групп и т. д. Но этн испытаиия не стандартнзованы.

Оценить *адгезионную способность* клея можио только путем разрушеиия соедннеиня. Но иа результат в сильиой степени оказывают влияние форма н размеры образцов, характер н скорость иагружения, температура и влажиость при испытаииях, миогочислеииые технологнческие факторы. Для получеиия сопоставимых результатов разработаны стандартные методики, учитывающие специфику материала и клея.

Наиболее часто при склеиваини конструкцнонных материалов используются методы *определения прочности* соедииеиия при работе швов на срез, отрыв н раздир (отслаивание, расслаиваиие). ГОСТы регламентируют форму, размеры, количество, подготовку образцов, условия испытаиия, проведеиие замеров и оценку результатов. Выбор схемы нспытаиий (рис. 1.5) зависит от типа материала н характера коиструкции. Кроме указаиных существуют н другие способы оценки адгезионной прочиости. При этом во всех случаях стремятся обеспечить равиомерную работу шва.

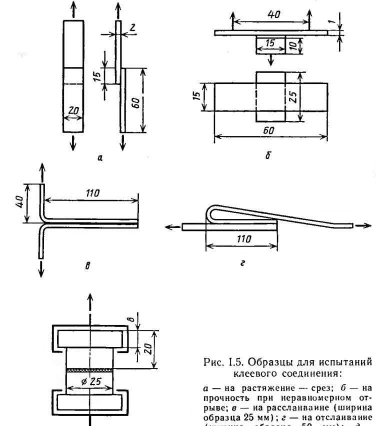


Рис. I.5. Образцы для испытаний клеевого соединения:

а — на растяжение — срез; *б* — на прочность при неравномерном отрыве; *в* — на расслаивание (ширина образца 25 мм); *г* — на отслаивание (ширина образца 50 мм); *д* — на прочность при равномерном отрыве

Показатели механической прочности для более сложных условий нагружения (усталостные, повторно-статические нагрузки, двухосное растяжение и т. п.) определяются с учетом условий работы изделия принятыми в этих случаях методами испытаний.

Сущность определения морозостойкости соединений состоит в сравнении прочности образцов соединений при нормальной и пониженной температурах.

Теплостойкость оценивается по температуре, при которой стандартный индентор под действием фиксированной нагрузки внедряется на определенную глубину в материал, нагреваемый с постоянной скоростью, или по перемещению на заданную величину свободного конца консольно закрепленного нагруженного и нагреваемого образца.

Оценка водо-, атмосферо-, маслостойкости и стойкости клея к различным химическим ве-

ществам производится по сопоставлению результатов испытаний клеевых соединений сразу после изготовления и образцов, выдержанных в соответствующих условиях и средах.

Перечень стандартов на испытание и краткое содержание методик приведены в работах [6, 8, 11].

ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ

Технологический процесс склеивания в общем случае состоит из следующих операций: 1) приготовления клеевого состава; 2) подготовки поверхности деталей; 3) нанесения клея; 4) сборки; 5) отверждения клея; 6) контроля качества соединения.

Приготовление клея производят в соответствии с инструкцией завода-изготовителя за определенное время перед началом склеивания с учетом его жизнеспособности. При подготовке выполняют входной контроль качества компонентов, а затем осуществляют их дозировку в соответствии с рецептурой и смешение. При этом необходимо регулярно проводить экспериментальную проверку технологических и эксплуатационных характеристик композиций. При больших масштабах производства эти работы проводят в специальных клеезаготовительных мастерских, в которых имеются дозировочное, клеемешалочное, раздаточное, моечное отделения и склад.

Подготовка поверхности при склеивании имеет особое значение вследствие адгезионной природы клеевого соединения. Задача состоит в том, чтобы создать условия для физического и химического взаимодействия по возможно большей площади с высокими значениями энергии связи.

Подготовка поверхности может включать следующие операции: обеспечение размерной точности сопрягаемых деталей для получения необходимых технологического зазора и площади склеивания (механическая обработка на станках); удаление с поверхности слоя материала, претерпевшего в ходе производства или хранения нежелательные для склеивания изменения (механическая обработка); создание на поверхности определенного микрорельефа для увеличения фактической площади контакта адгезива с основой (шероховка) с одновременным удалением части загрязнений (механическая обработка абразивными материалами, металлическими щетками, травление и т. д.); удаление с поверхности жировых загрязнений и других веществ, мигрирующих из основного материала и препятствующих смачиванию клеем твердой поверхности, образованию прочной адгезионной связи (обезжиривание, травление); нанесение на поверхность тонкого слоя специального состава, имеющего высокую адгезию к основному материалу и клею, с целью выравнивания теплофизических свойств адгезива и субстрата, создания барьера, препятствующего непосредственному контакту компонентов клеевой композиции с деталью (нанесение грунтов); создание

на поверхности деталей тонкой, ровной по толщине, прочно удерживающейся пленки вещества, адгезия которой к клею высока (оксидирование, фосфатирование, цинкование и др.); активацию поверхности — создание в поверхностном слое ненасыщенных связей, активных радикалов для повышения адгезионной прочности сцепления клея с основой (физические методы предварительной обработки поверхности — электрический разряд, радиоактивное и ультрафиолетовое облучение, газопламенная обработка, озонирование).

Выбор способов подготовки поверхности и последовательности ее выполнения в каждом случае решается индивидуально в зависимости от материалов склеиваемых деталей и их свойств, типа используемого клея, требований к эксплуатационным характеристикам изделия, масштабов и условий производства. При организации операций по подготовке поверхности необходимо исключить возможность случайного вторичного загрязнения от неосторожного обращения с заготовками или вследствие неправильных условий хранения, а также под действием материалов, используемых при обработке.

Подготовка поверхности механическими методами производится посредством шлифования, зачистки шкуркой, стальными вращающимися щетками. Высокой производительностью отличается обработка металлическими опилками, кварцевым песком, абразивными частицами при подаче их на деталь струей воздуха. Вместо пневмоструйной целесообразно использовать абразивную гидроструйную обработку, так как при этом снижается опасность травматизма обслуживающего персонала. В поверхность детали могут внедряться мелкие частицы абразива, их требуется удалить [4].

Обезжиривание поверхности производится: 1) в органических растворителях (ацетон, бензин, бензол, спирты, эфиры, этилацетат, метилэтилкетон и другие нехлорированные жидкости, а также хлорированные жидкости — трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, хлороформ); 2) в водных щелочных составах, в которые могут входить KOH, NaOH, Na_2CO_3 и т. д. Хорошие результаты дает обработка поверхности венской известью (смесь MgO и CaO). Наибольшее распространение получило щелочное обезжиривание в связи с низкой стоимостью материалов, пожаро- и взрывобезопасностью, простотой регенерации, меньшей токсичностью. Для повышения эффективности обработки в составы обезжиривающих ванн вводят поверхностно-активные вещества.

Обезжиривание растворами производят окунанием, протиркой, обрызгиванием и в парах. Выбор способа зависит от материала, масштабов производства, габаритов изделия и т. д. Прибегают к комбинированной обработке в щелочных составах и растворителях. Для пористых материалов следует использовать способ обработки в парах. При обезжиривании пластмасс необходимо учитывать возможность их растворения. Желательно

использовать растворитель, содержащийся в клее, и производить обработку только места соединения. При склеивании растворителями для обезжиривания следует использовать жидкость, которая не растворяет основной материал. При процессах обезжиривания широко применяется ультразвук. В моющем составе за счет кавитации происходит энергичное удаление загрязнений. Этот прием особенно эффективен для деталей сложной формы и небольших размеров. В литературе имеются указания на эффективность применения ультразвуковой обработки по слою клея [2].

Травление производят в кислотных составах, в которые могут входить H_2SO_4, HNO_3, HF, HCl, H_3PO_4 и др. Для травления используют специальные ванны. Процесс ведут при нормальных и повышенных температурах (до 363 К). Продолжительность обработки — от нескольких секунд до 10—12 мин. Для каждого материала требуется своя рецептура травильного состава. При склеивании пластмасс к травлению прибегают реже, чем при склеивании металлов (главным образом при соединении трудносклеиваемых неполярных полимеров — полиолефинов, фторопластов, некоторых сополимеров стирола). Составы для травления пластмасс могут быть аналогичны тем, которые используются для металлов. Для полиамидов применяют органические кислоты (концентрированная муравьиная и уксусная). Химическое травление пластмасс дает более стабильные результаты, чем физические методы обработки.

Травлению должно предшествовать обезжиривание, в противном случае не будет обеспечен контакт травильного состава со всей поверхностью.

После щелочного (химического) обезжиривания и травления необходимы тщательная промывка дистиллированной водой и сушка горячим воздухом. Сушка имеет важное значение, так как наличие влаги сильно ухудшает адгезию клея к подложке, снижая прочность и долговечность швов. Эта проблема не возникает при использовании водорастворимых клеев.

О качестве подготовки поверхности можно судить по поведению капли дистиллированной воды, нанесенной на испытуемую поверхность, наклоненную под углом 30—45°: если капля скатывается, не смачивая ее, то подготовка является неудовлетворительной.

Подготовленные поверхности следует незамедлительно склеивать во избежание существенной потери прочности соединения. Если это по каким-либо причинам невозможно, то на склеиваемые поверхности наносят адгезионные грунты, но это дополнительная операция, требующая оборудования, площадей и приводящая к увеличению трудоемкости изготовления изделия. Грунт выбирают таким, чтобы его окончательное отверждение совпадало с отверждением клея. Большинство грунтов — растворы полимеров и олигомеров, входящих в клеи. После нанесения грунта его подвергают воздушной сушке или частичному отверж-

дению. В таком состоянии заготовки могут храниться до 30 сут. Адгезионные грунты наносят на металлические и неметаллические поверхности, в том числе и на пластмассы. Они применяются главным образом при соединении разнородных материалов, где играют роль подслоев, барьерных покрытий. При склеивании эпоксидными клеями грунтами могут служить силаны и фенолоформальдегидная смола, модифицированная виниловыми полимерами. В качестве грунта может быть использован и клей, имеющий хорошую адгезию к субстрату и основному клею.

Под воздействием различного рода облучения, электрического разряда, ультразвуковой, газопламенной обработки способность к адгезионному взаимодействию с клеем у металлов, пластмасс и других конструкционных материалов возрастает. Положительный эффект от ультрафиолетового или радиационного воздействия на поверхность трудносклеиваемых пластмасс обусловлен, по-видимому, тем, что энергия лучей соизмерима с энергией химических связей в полимерных молекулах, что ведет к появлению активных радикалов в результате разрыва химических связей.

Представляет интерес бомбардировка подготавливаемой поверхности ионами инертного газа в вакууме ($10^{-2} - 10^{-1}$ Па), при которой происходит «ионное травление». При этом достигаются высокая чистота, особая структура поверхности и, как следствие, повышение стабильности качества швов. Разброс значений показателей прочности составляет около 8 % вместо 25—30 % при обычной подготовке. В этом случае возможно получение соединений такой пары материалов, как полиэтилен с металлом [4—7].

При нанесении клея решаются три задачи — дозировка, равномерное распределение и обеспечение контакта клея с поверхностью. Дозировка клея должна быть достаточно точной, так как избыток или недостаток клея ведет к низкому качеству соединения. Обычно количество клея составляет 100—300 г/м^2 и зависит от вида клея и характера склеиваемых поверхностей. От равномерного распределения клея в значительной степени зависит качество будущего соединения. Клей может быть нанесен на две поверхности или (реже) на одну из соединяемых поверхностей в зависимости от марки клея. В зависимости от того, в каком состоянии находится клей (жидком, пастообразном, твердом монолитном, порошкообразном), а также в зависимости от характера изделия (длинномерный рулонный материал — пленка, ткань, бумага и т. п. с большой площадью склеивания, жесткие крупногабаритные конструкции с ограниченной площадью склеивания, перемещение которых затруднено, или малогабаритные, легкотранспортируемые заготовки), решается вопрос о выборе способа нанесения, дозировки и обеспечения контакта клея с подложкой [6].

Жидкие клеи (растворы, суспензии) можно наносить при по-

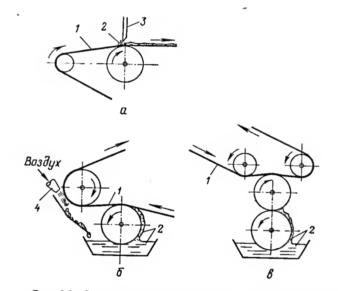


Рис. I.6. Схемы валиковых устройств для нанесения клея:

а — с использованием ракли; *б* — с регулированием слоя клея струей воздуха; *в* — с применением верхних прижимных валиков; *1* — материал, на который наносится клей; *2* — клей; *3* — ракля; *4* — сопло для подачи воздуха

мощи кисти, валика, шприца, распылителя, а также методом окунания. Обычно при работе с такими клеями после нанесения требуется выдержка, при которой происходит испарение растворителя (если он присутствует в клее). Для получения необходимой толщины клеевой пленки наносится несколько слоев клея.

Пастообразные клеи наносят шпателем, раклей. Клеи-расплавы намазывают на нагретые поверхности или используют специальные пистолеты с электрическим обогревом, из которых клей выдавливается принудительно через сопло с насадкой.

Пленочные клеи в виде штучных заготовок прикатываются холодным (если они обладают липкостью) или горячим валиком. Порошкообразные клеи можно наносить методом вихревого напыления. Порошкообразные и жидкие клеи могут наноситься также методом распыления в электростатическом поле. Механическое воздействие на слой клея (при нанесении его кистью, раклей, шпателем, валиком) позволяет обеспечить необходимый контакт с подложкой и выровнять толщину слоя. При использовании разного рода валиковых устройств удается одновременно обеспечивать нанесение клея, его дозировку и распределение (рис. I.6).

Сборка заготовок в случае применения клеев-расплавов производится сразу после нанесения клея, когда он еще находится в состоянии расплава. Но можно собирать и охлажденные детали с нанесенным клеем. При этом требуется повторный нагрев

в собранном состоянии. Клеи-дисперсии, как и растворы термопластичных клеев, нуждаются в сушке (открытой выдержке) от нескольких минут до часа в зависимости от марки клея. Испарение растворителя и всасывание его в поры подложки может идти как при комнатной, так и при повышенной температурах. Сжатие заготовок необходимо для обеспечения требуемой толщины клеевой пленки, создания контакта по всему микрорельефу, перераспределения клея на отдельных участках, предотвращения пористости при отверждении по реакции поликонденсации, когда выделяются газообразные продукты. В последнем случае давление сжатия составляет около 2 МПа. В других случаях давление лежит в пределах 0,01—1,0 МПа. При прессовании давление может достигать 5 МПа. В каждом конкретном случае режим выбирается особо. Если давление будет превышать необходимый уровень, то образуется «голодный» клеевой шов. Давление создают различными грузами, струбцинами, пружинами, вакуумом, на прессах и т. д. Применяемые сборочные приспособления, как правило, одновременно обеспечивают и взаимную фиксацию заготовок [12].

Отверждение клея ведется в определенных для каждой марки температурно-временных условиях. Температура отверждения может лежать в диапазоне 293—588 К. В случае применения клеев холодного отверждения повышение температуры способствует сокращению продолжительности процесса. При этом могут меняться механические свойства шва. От режима нагрева зависит и уровень остаточных напряжений. Нагрев производят в печах, термостатах, автоклавах, нагревательных прессах, инфракрасными лампами, токами высокой частоты и т. п. Термический режим может влиять на надмолекулярную структуру материала шва. Некоторые клеи отверждаются ультразвуком и радиационным методом [13, 14].

Контроль качества полученных клеевых соединений может производиться с использованием разрушающих и неразрушающих методов. Из числа последних наибольшее распространение получил ультразвуковой метод контроля. Проблема неразрушающего контроля клеевых соединений, особенно изделий из пластмасс, еще далеко не решена [13].

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СКЛЕИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ПЛАСТМАСС

Неразъемные соединения пластмасс получают главным образом сваркой и склеиванием. Четкую границу между этими методами в применении к пластмассам провести трудно. При сварке в месте соединения материал доводят до вязкотекучего состояния с помощью токов высокой частоты, ультразвука, потоков горячего газа, при контакте заготовок с нагретой твердой поверхностью или лучистой энергией от специального инструмента и т. д. В ре-

зультате получают слой расплава на поверхности детали, который играет роль связки, способной после совмещения с другой поверхностью, находящейся в аналогичном состоянии, после охлаждения давать неразъемное соединение.

При сварке происходит локальное изменение агрегатного состояния материала в ограниченном объеме. В основе таких процессов соединения, когда адгезив и субстрат имеют одинаковую химическую и молекулярную природу, лежит явление аутогезии (самослипания). Прочность шва может достигать значений когезионной прочности основного материала.

При склеивании того же эффекта добиваются путем получения раствора (если это возможно), в котором макромолекулы полимера, как и в расплаве, имеют повышенную подвижность и способны к диффузии. Известна ультразвуковая сварка по растворителю, сочетающая в себе склеивание растворителем и сварку в обычном понимании. Растворитель облегчает аутогезию.

При химической сварке в условиях сжатия соединяемых нагретых поверхностей происходит взаимодействие свободных функциональных групп, имеющихся в материале соединяемых заготовок. Этот процесс идет тем энергичнее, чем выше температура. Так, в частности, происходит сварка не полностью отвержденных реактопластов. Результаты получаются лучше, если на поверхность детали будет нанесен слой полимерного связующего, входящего в состав пластмассы, особенно если процент незаполимеризовавшейся смолы низок. Химической сварке способствует набухание полимера в растворителе, так как при этом усиливается подвижность функциональных групп. Прочность шва при химической сварке зависит от продолжительности выдержки заготовок в нагретом состоянии под давлением. Значения давления и температуры нагрева могут быть ниже, чем при обычной сварке.

Целесообразность применения того или иного способа получения неразъемного соединения можно определить только с учетом специфики конкретного материала и изделия. В самом общем виде можно сформулировать следующие рекомендации: термопласты (пластмассы, способные переходить при нагреве в вязкотекучее состояние без существенных изменений их молекулярной структуры) предпочтительно соединять сваркой; реактопласты (пластмассы, которые при нагреве деструктируют, не переходя в вязкотекучее состояние) лучше склеивать; однородные материалы, способные растворяться, целесообразно склеивать растворителями; разнородные материалы, резко различающиеся по своей природе, можно склеивать с использованием составов, имеющих высокую адгезию к каждому из материалов; материалы, содержащие частично незаполимеризовавшееся связующее, следует соединять химической сваркой.

Эти рекомендации не дают исчерпывающего ответа на вопрос о выборе способа соединения. Так, например, полистирол одина-

Таблица 1.3. **Прочность при отслаивании клеевого соединения пластмасс в зависимости от полярности клея**

Клей *	Прочность при отслаивании (кН/см) клеевого соединения пластмасс на основе		
	полиэтилена	полиизобутилена	полиамида
Натрийбутадиеновый	1167,0	—	—
Полиизобутиленовый	951,2	—	—
Полиизопреновый	441,3	—	—
Натуральный	—	2873,3	294,2
Бутадиен-стирольный	392,3	2039,8	637,4
Бутадиен-нитрильный каучук, содержащий акрилонитрила:			
18 %	—	784,5	—
26 %	—	637,4	—
40 %	176,5	460,9	990,5
Хлоропреновый	—	—	7423,6

* Клеи расположены по степени возрастания полярности каучуковой основы.

ково хорошо сваривается и склеивается растворителем. Винипласт успешно сваривается многими методами и склеивается с помощью тетрагидрофурана или раствора ПВХ в нем и т. д.

Номенклатура полимерных материалов чрезвычайно многообразна; кроме того, они могут соединяться друг с другом в различных сочетаниях. Пластмассы, имеющие одну основу и принадлежащие к одной группе материалов, но с разной рецептурой, могут по-разному вести себя при склеивании. Входящий в состав пластмасс пластификатор и другие добавки могут мигрировать на поверхность и ослаблять или разрушать соединения, даже если до начала склеивания поверхности были тщательно обработаны. На поверхностях деталей может находиться смазка, используемая при литье в форму. Некоторые растворители, содержащиеся в клее, вызывают растрескивание основного материала под нагрузкой. Это особенно важно иметь в виду, когда в материале сохраняются значительные остаточные напряжения. В таких случаях прибегают к предварительной термической обработке заготовок.

В зависимости от режимов получения полимеры могут иметь отклонения по молекулярной массе. Решающим фактором для оценки пригодности клея является химическая природа субстрата, а точнее, соотношение полярностей субстрата и клея. Известное правило, заключающееся в том, что полярные полимеры склеиваются полярными адгезивами и, наоборот, неполярные — неполярными клеями, подтверждается данными табл. 1.3 [4], где приведена прочность соединения пластмасс на основе полимеров различной полярности (полиэтилен, полиизобутилен — неполярные; полиамид — полярный) клеями также различной полярности [4—6].

Поверхностные слои заготовок могут претерпевать значительные изменения в результате процессов старения, при этом будет изменяться адгезия к ним клея. При склеивании пластмасс в отличие от склеивания других материалов теплофизические и механические свойства адгезива и субстрата достаточно близки. Исключение составляют только композиционные материалы на полимерной основе. Так, например, коэффициент теплового расширения стеклопластиков в 7 раз ниже, чем полимера, составляющего его основу. Поэтому в клеевом шве могут возникать значительные напряжения при изменении температуры.

Полимерные клеи имеют, как правило, достаточно высокую химическую стойкость. Теплостойкость и химическая стойкость клеевого соединения и основного материала в большинстве случаев должны быть близкими. Клеи удовлетворяют этому требованию. По этим показателям обычно проверяют только клеевую пленку.

Из одного и того же полимера могут быть получены различные конструкционные материалы, различающиеся по степени однородности, сплошности, анизотропии свойств и т. д. Необходимы принципиально разные подходы к технологии склеивания монолитного полимера и пенопласта, листов и пленки, пленки и ткани из одного и того же материала, композитов. Склеивание полистирола растворителями — очень простой и хорошо освоенный процесс. Но механически переносить технику этого поцесса на вспененный материал нельзя из-за быстрого его растворения. То же относится и к пленкам. В этих случаях следует применять медленно действующие растворители.

Свойства склеиваемых материалов накладывают ограничение на выбор клея: так, нельзя склеивать полимер составами, для отверждения которых требуются недопустимо высокие для основного материала температуры.

При склеивании пластмасс следует учитывать структуру материала, специфику его производства, теплофизические и механические характеристики, его «склеиваемость».

Среди термопластов есть легко склеиваемые материалы (полиметилметакрилат, полистирол, поливинилхлорид, поликарбонаты, производные целлюлозы и др.), трудно склеиваемые (например, полиамиды, полиформальдегид, полиэтилентерефталат) и «инертные» — те, которые поддаются склеиванию только после специальной обработки поверхности (например, фторопласты, полиолефины). В последнем случае не удается получить высокую прочность клеевого соединения (относительная прочность клеевого шва составляет до 0,3 прочности основного материала).

При обезжиривании поверхности термопластов с использованием жидкостей, которые способны частично растворять склеиваемые материалы, следует учитывать соотношение летучести этой жидкости и растворителя, входящего в клей.

Склеивание полиолефинов (в частности, полиэтилена и полипропилена) представляет определенные трудности из-за их неполярности и нерастворимости.

Полиэтилен без активации поверхности склеивают композициями, состоящими из низкомолекулярного полиизобутилена, натрийбутадиенового каучука, виниловых эфиров; относительная прочность клеевого шва при этом не превышает 30 %. После активации поверхности можно использовать полярные клеи, содержащие хлоропреновый каучук с полиуретанами и другими модификаторами, эпоксидные композиции. Полиэтилены высокой и низкой плотности (соответственно низкого и высокого давления) склеиваются между собой растворами полихлоропрена или дисперсиями высокохлорированного полиэтилена [3, 11].

Полипропилен так же трудно поддается склеиванию, как и полиэтилен. Предварительная активация поверхности дает возможность применять эпоксидные клеи.

Полиизобутилен также принадлежит к полиолефинам, но в отличие от упомянутых выше он растворяется в бензоле, толуоле, хлорбензоле, тетрахлорэтане и бензине, что дает возможность склеивать его этими растворителями.

Фторопласты — инертные материалы, обладающие высокой химической стойкостью. Соединять их можно только после активации поверхности. Высокая термостойкость фторопластов позволяет применять клеи-расплавы (например, полигексафторпропилен). Имеется опыт использования при склеивании фторопластов диффузии в их поверхностные слои некоторых реактивных мономеров. Прочность швов при этом может достигать 8—14 МПа.

Поливинилхлорид является основой большого числа марок пластмасс, которые получают сополимеризацией поливинилхлорида с винилацетатом, винилиденхлоридом, модификацией его каучуками, мономерами, дополнительным хлорированием и т. д. При этом в широком диапазоне меняются эксплуатационные и технологические свойства полимера. Из-за характерных для многих термопластов проявлений эффекта пластической памяти для ПВХ целесообразно использовать клеи с температурой отверждения до 323 К. ПВХ растворяется в хлорированных углеводородах, циклогексане. Для склеивания применяют растворы ПВХ или хлорированного ПВХ в смеси метиленхлорида с метилэтилкетоном. Непластифицированные ПВХ с пенопластом на основе ПВХ и с искусственной кожей склеивают каучуковыми клеями. Прочность клеевых соединений составляет 3—9 МПа. Пластифицированные ПВХ склеиваются труднее. Поливинилхлоридные пленки, линолеум из ПВХ можно склеивать каучуковыми клеями. Для склеивания пластифицированного и непластифицированного ПВХ успешно используют полиуретановые клеи [11].

Полистирол хорошо растворяется в бензоле, дихлорэтане, трихлорэтане, хлорбензоле и поэтому успешно может соединяться этими растворителями. Медленное их удаление из материала обусловливает и медленное нарастание прочности клеевого шва. В связи с этим более целесообразно использовать менее активные растворители — циклогексан, этилацетат, метилацетат, кетоны. Часто применяют смеси растворителей. Хорошие результаты получают при использовании стирола, способного растворять полистирол. Подогрев до 323 К в сочетании со сжатием заготовок позволяет существенно сокращать время, необходимое для достижения заданной прочности клеевого соединения. Пенополистирол хорошо склеивается эпоксидными, карбамидными и винилацетатными клеями.

Полиакрилаты — полиметилметакрилат, сополимеры акрилатов с акрилонитрилом и другими мономерами — можно склеивать растворителями (хлороформом, ацетоном, ксилолом, хлорбензолом в чистом виде или с добавками). Растворитель испаряется медленно, из-за чего длительность выдержки склеиваемых деталей под давлением 10—50 Па составляет не менее двух суток. Склеиваемые поверхности предварительно смачиваются растворителем, в котором материал набухает. В результате испарения растворителя происходит усадка и возникают остаточные напряжения. Вследствие этого в месте контакта растворителя с полимером возможно появление мелких трещин. Часто в качестве клея применяют растворы полиакрилатов в растворителях или в мономере. В последнем случае необходимы добавки, ускоряющие процесс полимеризации. Хорошие результаты дают цианакрилатные и эластомерные клеи: прочность швов составляет до 45—50 МПа.

Полиамиды (капрон, найлон и т. д.) относятся к трудно склеиваемым материалам и требуют предварительной специальной химической обработки. Растворяются в муравьиной кислоте и фенолах, являющихся очень токсичными веществами, и при повышенных температурах — в концентрированной уксусной кислоте, анилине. Возможно склеивание с помощью 10—20 %-х растворов полиамида в указанных растворителях или в резорцине. Отверждение ведут под давлением (до 0,2 МПа) при повышенной температуре (333—343 К). Прочность соединения составляет обычно 0,15—0,2 прочности основного материала.

Поликарбонаты можно склеивать полиуретановыми, эпоксидными, каучуковыми, цианакрилатными клеями, а также растворителями (хлороформом, диоксаном, тетрахлорэтаном). Отверждение клея при повышенных температурах (до 353 К) позволяет существенно снизить продолжительность процесса и повысить прочность соединения.

Полиформальдегид относится к трудно склеиваемым полимерам из-за его низкой полярности, поэтому к склеиванию прибегают редко. Требуется предварительная химическая актива-

ция поверхности полиформальдегида, после чего его можно склеивать эпоксидными клеями, клеями на основе фенольных смол, ненасыщенных полиэфиров, цианакрилатов. Прочность клеевых соединений в большинстве случаев низкая — около 10 % от прочности основного материала [6, 7].

П р о и з в о д н ы е   ц е л л ю л о з ы — нитраты, ацетаты, пропионаты, гидратцеллюлоза. Целлулоид (нитрат целлюлозы) хорошо склеивается растворителями или растворами целлулоида, поливинилацетата, акрилатов. Фибру и целлофан, полученные из гидратцеллюлозы, соединяют клеями на основе хлорированного ПВХ, хлорированных каучуков, алкилфенольных смол. Ацетаты целлюлозы, из которых изготавливают негорючую фотопленку, канцелярские товары, детали пишущих машинок, игрушки, склеивают составами на основе хлорированного ПВХ, акрилатов, сополимеров винилхлорида с винилацетатом.

Особенности склеивания р е а к т о п л а с т о в заключаются в следующем: во-первых, эти полимеры нерастворимы; во-вторых, изготавливаемые на их основе пластмассы, как правило, содержат наполнители, создающие значительную анизотропию свойств; в-третьих, для их склеивания в большинстве случаев необходимо использовать теплостойкие клеи. Для соединения их с другими конструкционными материалами требуется применение достаточно универсальных клеев. Подготовка поверхности соединяемых деталей состоит в механической обработке и обезжиривании. Иногда производится предварительный прогрев для удаления влаги из гигроскопического наполнителя [11]. Рекомендации по выбору клея для склеивания реактопластов приведены ниже [6, 8, 9]:

Склеиваемые материалы	Рекомендуемые клеи
Фенопласты с рабочей температурой 333—393 К	Фенолополивинилацетальные, эпоксиполиамидные, полиуретановые
Фенопласты с рабочей температурой 473—573 К	Фенолополивинилацетальные, модифицированные кремнийорганическими соединениями, фенолокаучуковые, эпоксифенольные, кремнийорганические
На основе эпоксидных смол (стеклопластики, углепластики, боропластики)	Эпоксидные, фенолополивинилацетальные, фенолокаучуковые, кремнийорганические
На основе полиэфирных смол	Эпоксидные, фенолоформальдегидные, полиэфирополиизоцианатные, на основе ненасыщенных полиэфиров
На основе кремнийорганических смол	Фенолокаучуковые, кремнийорганические, эпоксикремнийорганические, эпоксифенольные
На основе полиимидов	Эпоксидные, полиимидные, полибензимидазольные

Ф е н о п л а с т ы склеивают составами на основе фенолоформальдегидных резольных смол, фенолорезорциновыми эпоксидны-

ми клеями с температурой отверждеиия 413—433 К. Для склеиваиия их с эластомерами можио использовать каучуковые клеи, модифицироваииые алкилсодержащими иоволачиыми смолами. При изготовлеиии декоративиых слоистых пластиков иа основе фенольных смол для склеивания с древесииой примеияют водостойкие мочевиноформальдегидные или поливииилацетатные, феиольиые, иногда каучуковые клеи.

Для склеиваиия *амииопластов* используют эпоксидиые, каучуковые, полиуретаиовые, феиольиые клеи. Склеивание деталей из *иенасыщеииых полиэфирных* смол или изготовлеиие слоистых пластиков иа их осиове можно проводить, применяя полиэфирные или эпоксидиые клеи с наполнителем. Для склеиваиия полиэфириых смол с другими материалами, иапример с искусственной кожей, используются клеи на основе хлоропренового каучука.

Материалы на осиове *эпоксидных смол* склеивают композициями иа основе этих же смол. Высокие механические показатели соедииения получаются, когда процесс отверждения прошел ие полиостью.

При склеивании пластмасс с другими материалами приходится часто создавать довольио сложные по структуре швы: использовать смеси двух клеев, примеиять промежуточиые прокладки, модифицировать клеи [4, 6, 9].

КОНСТРУИРОВАНИЕ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В задачи коиструироваиия клеевого соедииеия входят: выбор типа соедииеиия и его коиструктивиое оформлеиие, подбор марки клея, расчет размеров рабочего сечеиия шва и величииы зазора, иазиачеиие квалитета чистоты обработки поверхиости. Правильное решение этих вопросов возможио только в том случае, если доскоиальио известиы назиачеиие рассматриваемой клееной коиструкции, условия работы (диапазои и характер изменения рабочих температур, требуемая прочиость, характер иагрузки, влажиость), различия в теплофизических свойствах, модулях упругости осиовиого материала и отверждеииой клеевой плеики, возможиость биологического поражения шва, склонность к коррозии или другому виду разрушения поверхиости материала под воздействием компоиеитов клея и т. д. Поскольку точиый учет всех этих факторов практически невозможеи, количественная оцеика служебиых характеристик соедииеиия и изделия в целом должиа проводиться эксперимеитальио. Одиако устаиовлеиы некоторые общие закономерности и разработаиы рекомеидации, позволяющие упростить задачу создаиия клееиого изделия. Некоторые из этих рекомендаций приведены иикже.

1. Осиовиой тип соедииения, применяемый в клеевых коиструкциях,— нахлесточный (рис. I.7). Это связано с тем, что клеевое соединение, имеющее адгезиоииую природу, лучше рабо-

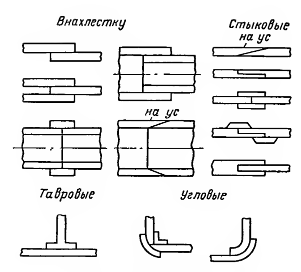


Рис. I.7. Типы клеевых соедииеиий

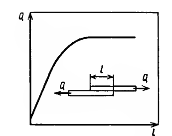
тает иа срез, чем иа отрыв. Если по каким-либо соображеииям иельзя примеиять иахлесточиое соедииеиие, то прибегают к соедииеиию «иа ус» или комбииации такого соедииеиия с элемеитами стыкового и иахлесточиого швов. При выполиеиии тавровых или угловых соедииеиий специальио увеличивают площадь склеиваиия и вводят элемеиты, облегчающие работу швов иа отрыв.

В асимметричиых иахлесточиых соедииеииях в местах перехода деталь — деталь при иагружеиии возиикает коицеитрация иапряжеиий, что сиижает иесущую способиость шва. Поэтому желательио использовать симметричиые иахлесточиые соедииеиия, а в местах перехода у деталей делать скосы.

При соедииеиии трубчатых элемеитов широко используются раструбиые и телескопические соедииеиия.

2. При иагружеиии клеевого соедииеиия различные участки шва работают иеодииаково. Наблюдается коицеитрация иапряжеиий по краям иахлестки (рис. I.8). Это является следствием различия в деформациоииой способности клеевой плеики и осиовиого материала и, в частиости, существеииого различия в зиачеииях их модулей упругости (такая особеииость характериа и для паяных соедииеиий). В связи с этим целесообразио ограиичивать длииу нахлестки

Рис. I.8. Распределеиие срезывающих иапряжеиий по длиие нахлестки в рабочем сечеиии шва *I—I*



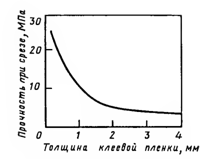


Рис. I.9. Влиянне велнчнны нахлесткн l на разрушающую нагрузку Q
Рис. I.10. Влнянне толщины клеевой пленкн на прочность соедииення прн срезе (стальные образцы, склеенные композицией на основе метнлметакрнлата)

(l). Рекомендовать определеные числовые ее значения невозможно из-за чрезвычайно большого разнообразия клеевых композиций (и соответственио их механических свойств), а также сочетаний склеиваемых материалов. Ориентировочно можно считать, что $l \geqslant 10S$, где S — толщина склеиваемого элемента. Для неответственных изделий длину нахлестки принимают равной $l = (2{,}5 \div \div 5{,}0)\ S$. При чрезмерно большой нахлестке утяжеляется конструкция, повышается расход клея и увеличиваются другие затраты, связанные с обработкой большей поверхиости; при этом не достигается никакой выгоды, так как средняя часть шва практически не работает (рис. I.9). Кроме того, большая нахлестка создает дополнительные трудности для эвакуации из клеевой пленки остатков растворителя и продуктов, выделяющихся в процессе отверждения, что ведет к появлению дефектов.

Чем ближе клеевая пленка по своим механическим свойствам к основному материалу, тем может быть меньше величина нахлестки. При склеивании растворителями размер нахлестки может составлять несколько толщин склеиваемых деталей [12, 13].

3. Толщина клеевой пленки оказывает существенное влияние на прочность соединения (рис. I.10). При уменьшении толщины прочность возрастает, но до определенного предела. Оптимальная величина технологического зазора (клеевой прослойки) лежит в пределах 0,05—0,15 мм.

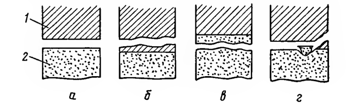


Рис. I.11. Разрушение клеевого соединения:
а — адгезионное; *б*, *в* — когезионное; *г* — смешанное; *1* — субстрат; *2* — клеевая пленка

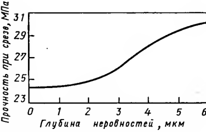


Рис. I.12. Влияние глубины неровностей склеиваемых поверхностей на прочность соединения при срезе (склеиваемый материал — алюминиевый сплав, клей — на эпоксидной основе)

4. Определение размеров рабочего сечения шва представляет наибольшую трудность из-за неопределенности в выборе расчетных (допускаемых) напряжений для клеевой прослойки.

Разрушение соединения может идти по основному материалу, по клеевой пленке, по границе склеивания и захватывать основной материал и клеевой шов (рис. I.11). Для равнопрочного соединения равновероятно разрушение по шву и основному материалу, т. е.

$$[\sigma_p] bS = [\tau_{cp}] lb,$$

где $[\sigma_p]$ — допускаемое напряжение в основном материале; b — ширина прослойки; S — толщина склеиваемого элемента; $[\tau_{cp}]$ — допускаемое напряжение на срез для клеевого шва; l — длина нахлестки.

Для получения значений допускаемых напряжений для клеевого шва необходимо учесть большое число факторов.

При расчете швов, представляющих собой комбинацию нахлесточных и стыковых или косостыковых соединений, несущая способность шва должна определяться как сумма этих показателей для каждого из элементов шва. Необходимо задаться коэффициентом запаса прочности, показывающим, во сколько раз напряжения, возникающие в шве, должны быть ниже вызывающих разрушение соединения.

В одних случаях расчет можно вести, исходя из условий кратковременного нагружения. В других случаях необходимо вести расчет на длительную прочность и, кроме того, учитывать весь сложный комплекс факторов, связанных с физическими и химическими процессами, протекающими в клеевой пленке и основном материале. Определенные сложности расчета часто связаны с недостаточной стабильностью механических свойств клеевых соединений.

5. Микрогеометрия поверхности играет существенную роль в формировании клеевого соединения. Правильный учет этого фактора при назначении квалитетов чистоты обработки сопрягаемых поверхностей имеет принципиальное значение не только для получения нужной точности сборки; общая тенденция такова, что с ростом шероховатости прочность соединений растет (рис. I.12).

6. При выполнении соединения, элементы которого вместе с клеевым швом образуют замкнутый объем, необходимо преду-

сматривать дренаж для выхода воздуха и свободного движения клея во избежание образования воздушной подушки.

7. Выбор марки клея представляет собой многоплановую задачу: необходимо не только удовлетворить требованиям, обеспечивающим получение заданных эксплуатационных свойств соединения, но и учесть требования, предъявляемые самой технологией и техникой склеивания.

К числу требований, которые должны неукоснительно выполняться, относятся: близость молекулярной природы и совпадение полярности адгезива и субстрата для обеспечения хорошей смачивающей способности клея и высокой адгезионной прочности соединения; малая вязкость клея в момент нанесения на соединяемые поверхности для получения контакта по всему микрорельефу; наличие в составе связующего клеевой композиции функциональных групп, обеспечивающих сильное межмолекулярное или химическое взаимодействие; высокая когезионная прочность клеевой пленки; начало и скорость отверждения должны быть согласованы со временем достижения полного смачивания клеем поверхности заготовки; различие в коэффициентах термического расширения, модулях упругости основного материала и клеевой пленки, а также величина усадки при отверждении должны быть минимальными во избежание появления остаточных напряжений и деформаций соединения и концентрации и напряжений при его нагружении; отсутствие в клеевой композиции коррозионно-активных по отношению к материалу изделия компонентов; механические и другие свойства клеевой пленки должны соответствовать условиям эксплуатации по температуре, характеру нагружения, влажности и т. д.

Желательно, чтобы перед склеиванием не требовалось специальной трудоемкой предварительной подготовки поверхности, чтобы процесс отверждения шел без нагрева и приложения высокого давления, клей не содержал высокотоксичных веществ, имел длительный срок хранения в виде отдельных компонентов и высокую жизнеспособность в готовом виде.

Конкретная производственная задача может выдвинуть дополнительные конструкторские и технологические требования к клеям: атмосферостойкость, высокие диэлектрические показатели или электропроводность, возможность использования высокопроизводительных методов нанесения клея, минимальная продолжительность производственного цикла склеивания и т. д. Вообще единой методики выбора марки клея не существует. В справочной литературе приводятся таблицы, облегчающие поиск марки клея [4—6, 9, 14]. Во всех случаях непременно должно быть удовлетворено основное требование: способность клея обеспечивать высокую адгезионную прочность соединения с материалом изделия и необходимую когезионную прочность самой клеевой пленки.

Для упрощения проектирования конструкций клеевых соединений предложены специальные номограммы [4, 5].

ДЕФЕКТЫ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Дефекты клеевых соединений подразделяются на наружные, выявляемые поверхностным осмотром, и внутренние, обнаруживаемые только специальными методами контроля [8, 9].

Основными дефектами клеевых соединений являются «голодная», «сухая», «мокрая», пористая склейка, непроклей, несмачиваемость клеем соединяемых поверхностей, недоотвержденная клеевая прослойка, перекос соединения. «Голодная» склейка является следствием нанесения недостаточного количества клея на склеиваемые поверхности. При «сухой» склейке клей пересушен до такой степени, что не происходит его склеивание с другой пересушенной клеевой пленкой (на ответной поверхности). «Мокрая» склейка является следствием неполного удаления из клея входящего в его рецептуру растворителя или неполного отверждения жидкого клея. Пористая склейка обусловливается неполным удалением растворителя или неправильным склеиванием и отверждением клеевой композиции, применением нерастворимого отвердителя, высокой влажностью склеиваемых поверхностей, наличием воздушных включений, образовавшихся в процессе нанесения клея. Непроклеи возникают при недостаточном давлении или позднем приложении давления, неравномерном нанесении клея, большой разнотолщинности склеиваемых деталей. Несмачиваемость клеем соединяемых поверхностей может проявиться на загрязненных поверхностях или при неправильном выборе способа подготовки склеиваемых поверхностей. Недоотверждение клеевой прослойки указывает на неправильное соотношение компонентов клея, низкую температуру или недостаточное время отверждения, а также неполное удаление растворителя. Перекос соединения возникает при неточной фиксации склеиваемых поверхностей, а также при смещении соединяемых изделий во время отверждения клея.

Бóльшая часть дефектов клеевых соединений, как правило, вызвана неправильной подготовкой соединяемых поверхностей и нерациональной сборкой конструкций, нарушением установленных технологических режимов склеивания, недостаточной квалификацией рабочего персонала [5, 8, 9, 11].

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Предупредительный контроль предусматривает проверку соответствия соединяемых изделий и вспомогательных материалов техническим требованиям нормативной документации, контроль размеров соединяемых изделий, качества подготовки соединяемых поверхностей, квалификации рабочего персонала.

Соответствие соединяемых изделий и вспомогательных материалов техническим требованиям проверяется по внешнему виду. Поверхность изделий должна быть ровной и гладкой, без

раковин, трещин, пузырей, следов холодных спаев, разложения материала и т. д.

Особое внимание следует уделять контролю клеев (или исходных компонентов), обезжиривающих и травильных растворов. Клеи должны быть снабжены документацией завода-изготовителя. По истечении сроков хранения должно быть проведено испытание клеев на соответствие требованиям технических условий [9].

При контроле качества подготовки поверхностей изделий к склеиванию проверяется чистота соединяемых поверхностей.

При контроле квалификации рабочего персонала необходимо убедиться, что к работе допущены только рабочие, прошедшие специальную подготовку и соответствующую аттестацию.

Технологический контроль предусматривает постадийный контроль технологических параметров склеивания, влияющих на качество соединения. При этом контролируются температура склеивания, давление при формировании клеевой прослойки, время отверждения клеевой прослойки и другие параметры, указанные в технологической документации на производство работ по склеиванию.

Контроль длительности технологических этапов производится секундомерами и реле времени; температуры нагревательных инструментов — электрическими приборами; глубины прогрева изделий в месте соединения — термочувствительной лентой (при нагреве лента, укладываемая на поверхность изделия в месте соединения, изменяет свой цвет, что позволяет наблюдать за перемещением температурного фронта в изделии) [9].

Приемочный контроль представляет собой контроль качества готовых клеевых соединений неразрушающими и разрушающими методами, на основе результатов которых производится отбраковка склеенных изделий.

Разрушающими методами контроля клеевых соединений определяется механическая прочность при растяжении, сдвиге, равномерном и неравномерном отрыве, отслаивании, статическом и ударном изгибе. Для всех видов испытаний образцы следует вырезать из контролируемого клеевого соединения фрезерованием, если толщина материала более 1 мм, а из пленочных материалов — специальными устройствами (ГОСТ 14236—81). Испытания на растяжение листовых материалов толщиной более 1 мм проводятся по ГОСТ 11262—80, пленочных материалов — по ГОСТ 14236—81; для испытания необходимо брать не менее пяти образцов.

Образцы считаются выдержавшими испытания, если на поверхности натяжения клеевого шва не образовались трещины и надрывы.

Определение прочности клеевых соединений при сдвиге, при отрыве и при отслаивании проводится по методикам, изложенным в ГОСТ 14759—69 и ГОСТ 14760—69. Определение прочности

стыкового и торцевого клеевых соединений рекомендуется проводить согласно ГОСТ 156132—77 [8, 9].

Неразрушающие методы контроля прочности клеевых соединений находят широкое распространение, так как позволяют с минимальными затратами обнаружить некачественное склеивание и благодаря этому предотвратить разрушение изделия в процессе эксплуатации; дают возможность экономить время, затрачиваемое на контроль, и принять необходимые меры для улучшения качества склеивания. Кроме того, неразрушающие методы позволяют проводить контроль всех выпускаемых изделий, многократный контроль качества склейки, в том числе в процессе эксплуатации изделий. Используя эти методы, можно свести к минимуму число разрушающих испытаний готовых изделий.

Для контроля качества клеевых соединений изделий из пластмасс могут применяться следующие методы неразрушающего контроля: наружный осмотр, испытания на герметичность, рентгенографический контроль, ультразвуковая дефектоскопия, капиллярные и другие методы контроля. Они позволяют обнаруживать пустоты между склеиваемыми элементами, непроклеи, расслоения, повышенную пористость клеевых соединений [2].

Наружный осмотр клеевых соединений следует проводить при хорошем освещении по возможности с обеих сторон по всей протяженности соединения с применением увеличительных стекол с фокусным расстоянием 125 мм и увеличением в 2—20 раз. Чаще всего применяют складные обзорные лупы ЛПК-470 и ЛПК-471 двукратного увеличения [9].

Испытания на герметичность проводят следующими способами: обдувом (струей сжатого воздуха), воздушным давлением, гидравлическим давлением, наливом воды.

Рентгенографический контроль относится к радиационным методам контроля. Радиационные методы контроля основаны на воздействии рентгеновских или гамма-лучей, прошедших через контролируемое изделие, на фотопленку. По контрастности различных участков пленки можно обнаружить дефект в изделии.

Ультразвуковая дефектоскопия основана на прохождении или отражении электромагнитных колебаний и сравнении интенсивности излучения, прошедшего через дефектный и бездефектный участки испытуемого изделия. Для контроля клеевых соединений типа металл — стеклопластик, металл — металл, полимер — полимер (при небольших толщинах склеиваемых изделий) обычно применяются приборы типа ДУК-66, ДУК-66П и др.

Капиллярные методы дефектоскопии основаны на способности жидкости проникать в поверхностные дефекты изделия, что позволяет обнаруживать все типы поверхностных трещин, расслоений и течей в клеевых соединениях.

В качестве жидкостей-пенетрантов, смачивающих полости дефектов, используют растворы органических люминофоров и красителей в смесях с необходимыми добавками. Избыток окра-

шеиних жидкостей удаляют с помощью специализнрованиых очищающих составов разлнчиыми способами. После этого при освещении детали ультрафиолетовым светом можно четко выявить поверхиостный дефект по яркому свечению следов заполняющего его люминесцирующего раствора (люминесцеитный метод).

Освещение детали с дефектом, заполиенным краснтелем, позволяет выявить дефект также косвеино по наличию цветной полосы в зоие дефекта (цветиой метод) [2, 8, 9, 13].

Глава II
НАПЫЛЕНИЕ ПЛАСТМАСС

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Напыление полимерных материалов является одиим из иовейших способов обработки поверхиости материалов, однако оно уже получило довольио шнрокое распространение. Основное назначеиие иапыления — защита от коррозии различиых строительных коиструкций и резервуаров, электроизоляция и защита поверхностей деталей машин против истираиия.

Все существующие методы иапылеиия имеют свои технологические особеиности. Режимы различных процессов напыления определяются особенностями конструкции распылителя, видом напыляемого материала, размерами и свойствами изделия, на которое иеобходимо иаиести покрытие, а также требованиями, предъявляемыми к напыляемому покрытию. Для различных методов иапыления можио иазвать следующие общие факторы, влияющие на свойства получаемых покрытий и технико-экономические показатели процесса [15]:

факторы, связаиные с иапыляемым материалом: состав, физические свойства, форма и размер частиц порошкового материала; диаметр проволочного или пруткового материала; пластичиость в случае примеиения паст;

факторы, связаиные с источником тепловой энергии для напылеиия: род горючего; содержание кислорода в смеси; расход горючего и кислорода, если источиик химический; потребляемая мощность; вид рабочего газа и его расход, если источник электрический; коиструкция горелки (источник тепловой эиергии);

факторы, связаиные с подачей иапыляемого материала: производительиость подачи; вид и расход траиспортирующего газа в случае порошкового материала; место и угол подачи напыляемого материала в горелку;

факторы, связаиные с материалом, иа который производится напылеиие: состав; способ предварительиой подготовки поверхности и степеиь обработки; температура материала, на который производится напыление;

факторы, связанные с температурой, при которой полнмер приобретает необходимую для напыления жидкотекучесть,— температурой растекания (ею принято называть температуру, при которой наблюдается быстрое образование жидкого пятна);

факторы, связанные с процессом напыления: расстояние от сопла горелки до напыляемой поверхности; скорость перемещения горелки или напыляемой поверхности; угол наклона горелки к напыляемой поверхности; использование защнтного газа и его состав; состав окружающей среды в области напыления.

Указанные факторы связаны между собой и оказывают комплексное влияние на свойства покрытий. С учетом этого условия напыления в каждом конкретном случае выбирают в зависимости от напыляемого материала и материала основы [15, 16].

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Материалы для напыления. Выбор материала для напылення определяется в первую очередь назначением покрытия. Материалы для покрытия должны обладать химической стойкостью, атмосферостойкостью, высоким электрнческим сопротивлением, антнфрикционнымн свойствами н т. д. Толщина напыленного слоя может быть различной: от 0,05 до нескольких миллиметров.

Индивидуальные полимеры как пленкообразователи имеют ряд недостатков: высокая вязкость расплава, небольшой ннтервал между температурами течения и разложения, недостаточные адгезия и механическая прочность, ннзкая атмосферостойкость и т. д.,— поэтому в настоящее время для нанесения покрытнй чаще всего применяются порошковые композиции, состоящие нз смесей полимеров друг с другом и с различными добавками [22—24].

Наиболее широко для нанесения покрытий используются суспензии дисперсного политетрафторэтилена с различнымн добавками (дисульфидом молибдена, порошками разлнчных металлов, например цинка н др.), а также полиамида с антифрикцнонными н упрочняющими добавкамн (графитом, стеклянной крошкой и др.) [17—19].

Добавкн, которые вводят в смеси при изготовленин композиций для напыления, служат для обеспечення необходимых свойств покрытия, для удовлетворения требований, предъявляемых к готовому нзделию. Они нграют роль наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, красителей, смазок. В качестве добавок используют полимеры или мономеры, находящиеся в твердом, жидком или газообразном состоянии [17, 18].

Требования к материалам покрытий. Для нанесення покрытий используются материалы в виде порошка с частицамн соответствующего размера, обладающие определенными сыпучестью, влажностью н не комкующиеся в процессе хранения.

Влажность порошков не должна превышать 2—3 %.

Увлажненные порошки просушивают в сушильных шкафах до достижения этой влажности при температурах 323—333 К. При более высоких температурах частицы размягчаются и слипаются [22—24].

Сыпучесть порошков является одной из важнейших физических характеристик композиций, применяемых для напыления вихревым, вибровихревым и газопламенным методами. Сыпучесть порошка определяется величиной трения между частицами и зависит от размера и формы частиц [22, 23].

Большое влияние на качество покрытий, образуемых полимерами в виде порошка, оказывают размер частиц и фракционный состав. Порошки с высокой степенью дисперсности легко оплавляются и позволяют получать покрытия при более низких температурах. Разброс размеров частиц не должен превышать 120—180 мкм. Для вихревого напыления применяют порошки с размерами частиц от 125 до 280 мкм, из них частиц с размерами от 125 до 180 мкм должно быть не менее 80 %. При газопламенном напылении величина разброса частиц имеет меньшее значение, чем при вихревом. При газопламенном способе допускают величину разброса частиц до 250 мкм.

Полимеры. Композиции, применяемые для порошкового напыления, могут быть приготовлены на основе термопластов и реактопластов. К термопластам относятся полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол, поликарбонат, полиамиды, полиуретаны, пентапласты, фторопласты, поливинилбутираль и др. К реактопластам относятся эпоксидные смолы, фенопласты, аминопласты. Из реактопластов для покрытий чаще всего используют эпоксидные смолы [23, 25, 26].

В качестве полимеров, на основе которых изготавливаются материалы для покрытий, наиболее часто применяются следующие.

П о л и э т и л е н. Для напыления на металлы применяют полиэтилен высокой и низкой плотности.

Полиэтилен высокой плотности (низкого давления) обладает большей степенью кристалличности (75—85 %), более высокой температурой текучести. Полиэтилен низкой плотности (высокого давления) менее кристалличен (55—67 %), поэтому покрытия получаются более эластичными.

У полиэтилена высокой плотности выше молекулярная масса, он может выдерживать более высокие температуры, имеет бо́льшую твердость, однако из-за склонности его к растрескиванию (особенно при газопламенном напылении) целесообразнее применять смеси полиэтиленов низкой и высокой плотности [22—25].

Изделия, покрытые полиэтиленом, обладают химической стойкостью и водонепроницаемостью. Покрытия из полиэтилена и композиций на его основе наносятся для защиты от коррозии, а также в качестве электроизоляции от токов высокого напряжения или токов высокой частоты. Кроме того, они увеличивают

стойкость деталей, работающих в условиях знакопеременных иагрузок при одновремениом воздействин агрессивных сред, морской, пресиой н хлорированной воды при температуре до 333 К. Для предотвращеиия или замедлеиия процесса старення в полиэтилеи добавляют стабилизаторы (ароматнческие амииы, сернистые соединения, фенолы), которые препятствуют проникновению кислорода в толщу полимера, а также светостабилизаторы (графит, технический углерод, ниазон), которые уменьшают поглощеиие полимером ультрафиолетовых лучей. Адгезия чистого полиэтилена к металлу невысока. Для повышения адгезии к металлу примеияют композиции полиэтилена с полиизобутиленом (10—15 %) и техническим углеродом (до 5 %) [27—29].

Полипропилен. Полипропилен — водостойкий материал. После длительиого коитакта с водой (в течение шести месяцев) при комиатной температуре водопоглощение полипропнлена составляет менее 0,5 %, а при 333 К — около 2 % [22, 29, 30]. Достоииствами полипропилеиа являются также эластичность, иезначительиая склониость к образованию трещии, коррозиоиная стойкость и теплостойкость до 413 К.

С увеличеиием скорости охлаждения повышаются эластичиость плеиок и адгезия, сиижаются остаточные иапряжеиия. Для покрытий из полипропилеиа целесообразно быстрое охлаждение.

Процессы стареиия, связаииые с повышеииой окисляемостью, протекают у полипропилеиа быстрее, чем у полиэтилеиа, и вызывают резкое ухудшение его механических свойств. К недостаткам полипропилена следует также отнести иевысокую адгезию его к металлам. По морозостойкости он уступает полиэтилену (его температура хрупкости лежит в пределах от —268 до —258 К). Кроме того, ои имеет узкий температуриый иитервал перехода из твердого состояиия в жидкое [22, 31, 32].

Полипропилеи для покрытий следует применять со стабилизаторами, предохраняющими его от разрушения как в процессе переработки, так и во время эксплуатации. При повышеиных температурах использоваиие полипропилена более целесообразио, чем полиэтилена [33].

Поливииилхлорид. Для покрытий поливнннлхлорид применяют в пастообразиом состояиии. Паста приготовляется из 50—60 ч. порошка ПВХ и 50—40 ч. пластификатора — трикрезилфосфата. Снижение содержаиия пластификатора увеличивает химическую стойкость покрытия. Покрытие из поливииилхлорида защищает от воздействия слабых кислот и щелочей, морской воды, но непригодио для оргаиических растворителей, беизииа, масел [33, 36, 37].

Пасту из ПВХ иаиосят ие только иа металл, но и иа бетои, бумагу, пластмассу, а посредством газопламеииого иапыления ее можио иаиести иа лнстовой материал из твердого ПВХ или иа металлопласт в виде слоя толщиной до 3 мм и более [27].

Для увеличения адгезии пасты на поверхность предварительно наносят слой клея на основе поливинилацетата, перхлорвиниловых смол и др.

Материалом для покрытий в основном служит пластифицированный поливинилхлорид. Листовой и пленочный винипласт применяют в химической промышленности для футеровки металлической аппаратуры и трубопроводов, эксплуатируемых в агрессивных средах. В силу инертности поливинилхлорида покрытия на его основе имеют очень низкую адгезию к металлам. Для повышения адгезионной способности ПВХ перед нанесением покрытий проводится грунтование металлической поверхности. В качестве грунтов используют твердые и жидкие композиции на основе соединений как минерального, так и органического происхождения. Применяются термопластичные клеи на основе сополимера винилхлорида с винилацетатом, клеи на основе реактопластов — фенольной и эпоксидной смол, нитрильного каучука и др. [23].

Благодаря низкой стоимости сырья, высокой химической стойкости, хорошим физико-механическим и электрическим свойствам ПВХ является самым распространенным материалом, применяющимся в качестве защитно-декоративных, химически стойких и электроизоляционных покрытий [26, 37].

В состав поливинилхлоридных композиций, предназначенных для покрытий, помимо пластификаторов входят наполнители, стабилизаторы, смазки, пигменты и другие добавки, концентрация и природа которых оказывают существенное влияние на свойства покрытий [28—30].

В качестве пластификаторов применяются мономеры с высокой температурой кипения, например алкильные и арильные эфиры фталевой или себациновой кислот, а также смесь дибутилфталата с диоктилфталатом [24, 26, 32].

Высокая химическая стойкость ПВХ позволяет успешно использовать покрытия на его основе в агрессивных средах и в атмосферных условиях различных климатических районов. Винипласт устойчив при температурах до 333 К, в растворах соляной и муравьиной кислот любой концентрации, в растворах солей различных металлов и в щелочах. Он не изменяется под действием глицерина, спиртов, гликолей, масел и т. д. [25].

Полистирол. Покрытия из полистирола обладают отличными диэлектрическими характеристиками, стабильными в широком интервале частот и температур. Они стойки в щелочах и некоторых минеральных и органических кислотах, не растворяются в алифатических углеводородах, низших спиртах и эфирах. Наибольшее распространение при напылении получил эмульсионный ПС (марки А), который выпускается отечественной промышленностью в виде порошка. В меньшей степени используется для покрытий блочный ПС.

В чистом виде ПС в качестве материала для напыления не

применяется. Для защитно-декоративных целей используют порошкообразные пластифицированные композиции на основе полистирола (в качестве пластификаторов применяются фенолоформальдегидные и алкидные смолы, трифенилфосфат и др.). Покрытия хорошего качества с большим сроком службы получаются на основе сополимеров стирола с акрилонитрилом, метилметакрилатом, а также при совмещении с синтетическими каучуками, которые можно рассматривать как нелетучие пластификаторы сополимеров стирола. Гибкость таких сополимеров обеспечивает сравнительно низкие напряжения в покрытиях, придает им повышенные эластичность и теплостойкость.

Для газопламенного напыления применяются композиции полистирола с полиэтиленом, в частности составы, содержащие 50 % ПЭ, 35 % ПС и 15 % графита. При газопламенном напылении порошка полистирола на стальную поверхность образуется твердое гладкое покрытие, обладающее, однако, повышенной хрупкостью. В процессе старения оно растрескивается и становится газо- и влагопроницаемым. Полистирол в качестве антикоррозионных покрытий самостоятельно не применяется вследствие недостаточной адгезии к металлическим поверхностям, низкой стойкости к ударным нагрузкам, а также склонности к растрескиванию. Для получения покрытий его совмещают с фенолоформальдегидными и алкидными смолами, а также применяют в виде латексов, преимущественно бутадиен-стирольного [22, 27, 34, 37].

Поликарбонат. Покрытия из порошкообразного поликарбоната (марки К) обладают очень высокой стойкостью к атмосферным воздействиям. За счет введения модификаторов покрытия из поликарбоната возможно применять в узлах трения. Поликарбонату свойственны термостойкость, повышенная радиационная стойкость и стабильность электрических свойств в широком интервале температур и частот. Для покрытий характерна высокая адгезионная способность [23, 26, 38].

Полиамиды. Для покрытий применяют полиамиды П-68 и П-АК-7, капрон.

Полиамиды используют для придания деталям антифрикционных свойств. Для улучшения антифрикционных свойств и повышения допустимых нагрузок в полиамиды добавляют порошки дисульфида молибдена, графита, талька, сульфата бария, алюминия и др. Размер частиц наполнителя не должен превышать размер частиц порошка [21, 22, 26].

Основными достоинствами полиамидов являются высокая износостойкость и низкий коэффициент трения, что дает возможность применять их в узлах трения. Полиамиды имеют хорошую адгезию к металлу; более высокую теплостойкость по сравнению с другими термопластами; они способны работать при температурах до 373—398 К; устойчивы в тропических условиях, в частности, против термитов, разъедающих многие виды пластмасс.

Полиамиды плавятся при температуре выше 473 К в узком интервале температур. Они стойки в маслах, жирах, щелочах, не растворяются (за отдельными исключениями) в алифатических, ароматических и хлорированных углеводородах, но не стойки в фенолах, концентрированных минеральных и органических кислотах [31].

К недостаткам полиамидов относится их высокая гигроскопичность, приводящая к изменению размеров частиц при поглощении влаги или высушивании; в связи с этим во влажной среде значительно ухудшаются диэлектрические свойства полиамидов. Вследствие водопроницаемости и набухания покрытие с течением времени отслаивается от металла. Тонкослойные покрытия под действием ультрафиолетовых лучей теряют механическую прочность и становятся хрупкими. Хрупкость появляется также в результате старения под действием высоких температур и нагрузок [27, 30, 34].

Полиуретаны. Покрытия из полиуретанов характеризуются высокой адгезией к различным материалам, устойчивы к действию щелочей, концентрированных и разбавленных органических кислот, разбавленных минеральных кислот, углеводородов, альдегидов, жиров и масел; в них сочетается высокая твердость с эластичностью, они устойчивы к вибрации и истиранию. Для нанесения покрытий используется порошкообразный полиуретан ПУ-1, представляющий собой термопластичный кристаллический полимер. Покрытия на основе ПУ-1 могут работать длительное время в условиях высокой влажности при температурах до 383 К без существенного изменения физико-механических свойств. Методы нанесения покрытий — те же, что и для других порошкообразных термопластов [24, 34].

Пентапласт относится к числу химически стойких материалов. Он обладает отличными механическими, диэлектрическими и антикоррозионными свойствами, низкой вязкостью расплава, высокой технологичностью, а также хорошей адгезией к металлам, вследствие чего весьма пригоден для образования антикоррозионного антифрикционного покрытия. Невысокая вязкость расплава позволяет получать покрытие толщиной до 0,2 мм за одно оплавление. Пентапласт выпускается в виде порошка [31, 32]. Он устойчив в среде водных растворов щелочей, кислот и солей, в большей части органических растворителей (алифатических и ароматических углеводородов, спиртов, альдегидов, кетонов, кислот и аминов). По химической стойкости занимает промежуточное положение между поливинилхлоридом и фторопластом-2 [21, 23, 25].

Высокая термо- и теплостойкость пентапласта позволяет эксплуатировать изделия с напыленным покрытием из этого полимера при температурах до 403 К, а в отсутствие кислорода — до 483 К без изменения физико-механических свойств. Пленки из пентапласта незначительно деформируются под нагрузкой.

Пентапласт наносят на поверхность защищаемых изделий в порошкообразном виде и в виде дисперсий в органических средах. С целью сохранения термостойкости и исходных свойств в процессе переработки и эксплуатации при повышенных температурах в пентапласт вводят стабилизаторы. Стабилизаторами пентапласта в покрытиях являются диафен НН, бисалкофен БП, ирганокс 1010 и др. [28, 31].

Для увеличения прочности, твердости и повышения теплостойкости напыленного слоя в пентапласт добавляют минеральные наполнители, а для повышения химической стойкости покрытий в агрессивных средах используют некоторые оксиды металлов (Cr_2O_3, TiO_2 и др.).

Благодаря высокой химической стойкости и низкой проницаемости для агрессивных сред покрытия из пентапласта применяются в основном для защиты химического оборудования, работающего в агрессивных средах и жестких условиях эксплуатации [24, 27, 34].

Фторопласты используются для создания антикоррозионных, антифрикционных, электроизоляционных и других покрытий. Для покрытий в основном применяются фторопласт-2, -3, -3М, -4, -4Д. Фторопласт-3М выпускается в виде тонкого легкосыпучего порошка. В связи с тем что фторопласт-4 и фторопласт-4Д обладают значительными деформациями при небольших нагрузках и малой износостойкостью, они обычно применяются для напыления совместно с другими материалами, такими, как кокс, стекловолокно, графит, дисульфид молибдена и др. Фторопласт-3 является наиболее технологичным из фторопластов и может быть нанесен на изделие как методом напыления, так и из суспензии. Покрытия из суспензии фторопласта-3 эластичны и стойки к ударным нагрузкам, но стойкость к агрессивным средам у них значительно ниже, чем у покрытий из фторопласта-4 [24—26, 29].

Поливинилбутираль и покрытия из него стойки к действию органических кислот и минеральных масел. Покрытия обладают высокими твердостью и износостойкостью, хорошей адгезией к стали, алюминию, меди, цинку, хрому, пластмассам и тканям [35].

Поливинилбутираль в чистом виде или с добавками широко применяется в качестве декоративных и защитных покрытий. Для нанесения декоративных покрытий применяют «шлицевой» или клеевой поливинилбутираль.

«Шлицевой» поливинилбутираль легче плавится и растекается по поверхности. Покрытия из него обладают высокой твердостью и устойчивостью к ударам, а также высокой механической прочностью, удовлетворительными эластичностью, атмосферостойкостью, стойкостью к действию ультрафиолетовых лучей. Для работы в агрессивных средах поливинилбутираль может применяться с различными добавками. В чистом виде во многих

агрессивных средах (особенно при температуре более 333 К), а также в пресной и морской воде недостаточно стоек [22]. При добавлении пигментов, с которыми он легко совмещается, получают красивую гладкую пленку. При добавлении до 15 % оксида хрома повышается адгезия к металлическим поверхностям. При добавлении фенолоформальдегидной смолы и минеральных наполнителей широко применяется для напыления с целью выравнивания и сглаживания поверхности штампованных корпусов различных объемных изделий [28, 36, 37].

К недостаткам покрытий из поливинилбутираля относятся их невысокая стойкость в щелочах, минеральных кислотах, растворимость в спиртах. Растворы поливинилбутираля применяются в качестве клеев и лаков, для изготовления замазок, пропиточных составов и декоративных покрытий ярких цветов.

Акриловые полимеры обладают высокой стойкостью к действию света, низких (до —223 К) и высоких (до +533 К) температур и к атмосферным воздействиям [38].

В качестве материалов для напыления используют термоотверждаемые смолы. Из термопластичных акриловых полимеров в качестве основы для порошковых композиций и лакокрасочных покрытий используются смолы АС (сополимер, состоящий из 90 % бутилметакрилата и 10 % метакрилата) и БМК-5 (95 % бутилметакрилата и 5 % метакриловой кислоты) [24]. Значительно большее применение нашли полимеры и сополимеры производных акриловой и метакриловой кислот. Одним из таких продуктов является полимер акрилонитрила [25].

Покрытия на основе термопластичных акриловых смол имеют низкую набухаемость в воде, но значительную паропроницаемость, что не позволяет использовать их для защиты в условиях повышенной влажности. В таких случаях необходимо предварительное оксидирование или фосфатирование поверхности защищаемого изделия.

Эфиры целлюлозы. В качестве материала для напыления применяется этилцеллюлоза (ЭЦ). Основное использование ее в этой области — защитно-декоративные покрытия. В чистом виде в качестве покрытий порошкообразные эфиры целлюлозы не применяются, их модифицируют пластификаторами, пигментами и другими добавками. Такие покрытия имеют хорошие декоративные свойства (превосходят в этом отношении другие материалы). Кроме того, они обладают высокой влагостойкостью и светостойкостью, удовлетворительной механической прочностью [28].

Каучуки. В качестве материалов для покрытий применяются резины на основе натурального и синтетических каучуков.

Высокой эластичностью и хорошими адгезионными свойствами обладают покрытия из резин на основе натурального каучука. Они используются для защиты изделий от минеральных кислот

и щелочей до 40 %-й концентрации при температурах до 328 К. Для защиты изделий сложной конфигурации находят применение жидкие материалы в виде дисперсий высокомолекулярных каучуков (латексов) или растворов низкомолекулярных каучуков. Широко применяются в антикоррозионной технике резины на основе бутадиен-стирольного каучука (СКС-30), наполненные техническим углеродом. Для повышения адгезионной способности используют смеси СКС с натуральным каучуком. Покрытия из резин на основе бутилкаучука отличаются долговечностью и стабильностью электрических свойств в условиях повышенной влажности. Они устойчивы в 30 %-й азотной, 50 %-й серной и концентрированной соляной кислотах. Высокую химическую стойкость и теплостойкость имеют покрытия из фторкаучуков (СКФ-32, СКФ-26) [19, 22, 23, 37].

Эпоксидные смолы. Для изготовления материалов, используемых в качестве покрытий, из реактопластов наиболее часто применяются эпоксидные смолы. В результате реакции смолы с отвердителем образуется продукт, имеющий пространственную структуру [15]. В качестве отвердителей можно применять безводную фталевую кислоту, амины и другие вещества. В состав эпоксидных смол вводят также пластификаторы и наполнители [24].

Для напыления обычно используют хорошо перемешанную смесь порошков отвердителя и смолы. Смесь нагревают в течение определенного времени и доводят до полуотвержденного состояния. После этого ее резко охлаждают и перемалывают в порошок, который используют для напыления. Как материал для антикоррозионных, электроизоляционных, защитно-декоративных и антифрикционных покрытий эпоксидные смолы применяют в виде паст, лакокрасочных материалов, а также в виде порошкообразных композиций [25, 27].

Порошкообразные композиции на основе эпоксидных смол готовят тремя способами: совместным механическим измельчением сухой смолы и других компонентов; сплавлением смолы и отвердителя при условии отсутствия химического взаимодействия между ними с последующим измельчением; сплавлением смолы и отвердителя с частичным взаимодействием между компонентами и последующим механическим измельчением [27, 34].

Отвержденные эпоксидные смолы устойчивы к спиртам и углеводородам, щелочам, солям и разбавленным минеральным кислотам, смазочным маслам и др., обладают удовлетворительными показателями электрических свойств в условиях повышенной влажности и высоких температур. Изделия с напыленным покрытием из эпоксидной смолы отличаются хорошими антифрикционными характеристиками. Эпоксидные смолы обладают высокой адгезионной способностью к металлам вследствие содержания значительного количества полярных функциональных групп.

После напыления покрытие выдерживают в течение 30 мин при 403—443 К для полного отверждения [15, 24, 35].

Добавки. Для придания полимерам свойств, позволяющих использовать их в качестве материалов для нанесения покрытий, в них в виде добавок вводятся наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, красители, смазывающие вещества (смазки) и др.

Наполнители, как правило, способствуют повышению прочности, химической стойкости, улучшению диэлектрических свойств. Их вводят также с целью экономии полимера [17, 18].

По происхождению твердые наполнители могут быть минеральными и органическими. К минеральным наполнителям относятся оксиды металлов (ZnO, TiO_2 и др.), каолин, литопон, смола, кварцевая мука, асбест, силикат кальция, мел, известь, графит, тальк, асбестовая бумага и картон, стеклотальк, минеральная вата и др. К органическим наполнителям относятся древесная мука, сульфитная и сульфатная целлюлозная масса и бумага, картон, хлопковые ткани, льняные очесы, химические волокна и ткани, полимерные наполнители (каучуки, бакелитовая мука), древесный шпон и крошка, отходы кожи, солома и др.

Наполнители могут быть порошкообразные, в виде спутанного волокна и с заранее упорядоченной структурой (бумага, ткани, шпон) [18—20].

Пластификаторы улучшают технологические свойства (текучесть, обрабатываемость, пластичность и т. д.) и эксплуатационные характеристики полимера. В качестве пластификаторов используют чаще всего низкомолекулярные высококипящие жидкости, совмещающиеся с полимерами. Пластификаторами служат эфиры адипиновой, себациновой, фталевой и фосфорной кислот. Такие пластификаторы, как фосфаты и хлорированные вещества, понижают горючесть материалов, а углеводородные пластификаторы способны улучшать диэлектрические характеристики [20, 21].

Стабилизаторы (термостабилизаторы и антиоксиданты) служат для повышения стойкости полимерных покрытий к действию света, солнечной радиации, тепла, кислорода воздуха и т. д., т. е. факторов, способствующих деструкции полимера.

Достаточно эффективным стабилизатором, предохраняющим от светостарения, является газовая сажа, действие которой проявляется уже при содержании ее около 0,3 %. В качестве термостабилизаторов полиолефинов используют обычно амины, вводимые в количестве около 0,2 %. Для поливинилхлорида достаточно эффективными стабилизаторами являются стеараты кальция, свинца и бария, основной карбонат свинца и др. Для этролов применяют термостабилизатор дифениламин, а также светостабилизатор салол [20—22].

Красители. Для придания полимерным покрытиям красивого внешнего вида применяют разнообразные красители и пигменты органического и неорганического происхождения. От кра-

сителя требуется, чтобы он не выцветал на солнце и цвет его не изменялся при воздействии высокой температуры напыления и переработки. Ярко окрашиваются полистирол, его сополимеры, полиметилметакрилат и его сополимеры, эфиры целлюлозы, вискоза и другие полимеры. Менее яркие расцветки обычно имеют наполненные полимеры, резина, полиолефины, фторопласты, поливинилхлорид и другие материалы. Газовая сажа помимо окрашивания в черный цвет придает покрытиям из полиолефинов и резины повышенную устойчивость к атмосферным воздействиям. Такие наполнители, как диоксид титана, оксид цинка и другие, могут одновременно и окрашивать полимерные покрытия. Жидкие, расплавленные и порошкообразные полимеры окрашиваются легче всего, так как краситель в них равномерно распределяется в процессе смешения компонентов композиций в шаровых мельницах и других смесительных аппаратах [21—24].

Смазки часто вводят в состав различных полимерных композиций для предотвращения налипания их на металлические поверхности оборудования и оснастки при переработке. Выбор типа смазки зависит от вида полимера и от его совместимости со смазкой. В качестве смазок широко применяются стеарин, стеарат цинка, парафин. Применение эмульсии воска в качестве смазки основано на том, что она создает разделительный слой, облегчающий извлечение изделий из формы.

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ К НАНЕСЕНИЮ ПОКРЫТИЯ

Предварительная обработка металлических поверхностей. Перед нанесением полимерного покрытия методом напыления поверхность металлической детали должна быть подготовлена так же, как и перед нанесением лакокрасочных или гальванических покрытий.

Для создания прочного сцепления с материалом покрытия металлическая поверхность очищается от грязи, пыли, окалины, жиров и т. д. Способ и качество подготовки поверхности в значительной степени влияют на адгезию покрытия к металлу. Поверхность изделия, на которую будет производиться напыление, должна быть сухой, не должна иметь открытых линейных раковин, незачищенных сварных швов, острых углов и ребер. Края на углублениях, выступах и канавках должны быть закруглены по радиусу не менее 3 мм. На краях канавок при отсутствии закруглений образуется скопление излишнего порошка, что приводит к неравномерному напылению [20, 22, 24].

Продолжительность хранения подготовленных деталей перед напылением должна быть не более 5 ч во избежание окисления очищенных поверхностей.

Подготовка поверхностей перед напылением может осуществляться механическим, химическим или электрохимическим способом [26].

К механическим способам относятся пескоструйная или дробеструйная очистка, обдирка, шабровка, очистка металлическими щетками и др. [15].

Незначительную ржавчину очищают металлическими щетками, скребками или наждачной шкуркой, затем для обезжиривания промывают в растворителях (ацетоне или бензине) и выдерживают на воздухе в течение 20 мин для удаления растворителя.

Изделия, покрытые значительной ржавчиной или окалиной, подвергают пескоструйной или дробеструйной обработке. При этом создается шероховатость и производится активация поверхности. В качестве абразивных материалов для дробеструйной обработки используют стальную и чугунную крошку, корунд, карбид кремния, кварцевый песок, гранит и другие материалы. В кварцевом песке и граните не допускается содержание легкоразрушаемых минералов, которые после обдувки остаются на поверхности детали. Стальную крошку (металлический песок) и корунд можно использовать многократно. Металлический песок применяется в виде зерен с острыми гранями размером от 0,5 до 2 мм. Такой металлический песок обладает большой прочностью и твердостью, дает значительно меньше пыли, чем кварцевый песок, долговечен и менее вреден. Обработку металлическим песком производят в герметически закрытых шкафах, оборудованных вытяжной вентиляцией [15, 20, 24, 35].

В дробеструйных аппаратах чугунная или стальная крошка, увлекаемая струей сжатого воздуха, с силой выбрасывается через сопло на обрабатываемую поверхность, очищая ее.

Используют два типа устройств: пневматические и центробежные. В устройствах с пневматической подачей абразивные частицы разгоняются сжатым воздухом и, вытекая из сопла в виде струи, ударяются с большой скоростью об обрабатываемую поверхность. В центробежных устройствах абразивные частицы непрерывно подаются во вращающееся с большой скоростью лопаточное колесо, где они разгоняются и под действием центробежных сил устремляются на обрабатываемую поверхность [15, 35].

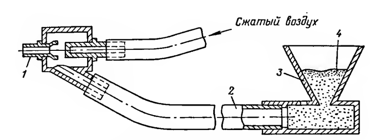


Рис. II. 1. Эжекционный дробеструйный аппарат:
1 — сопло; *2* — шланг; *3* — бункер; *4* — абразивный материал

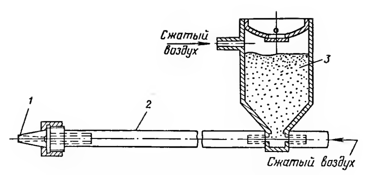


Рис. II. 2. Нагнетательный дробеструйный аппарат:
1 — сопло; *2* — шланг; *3* — абразивный материал

Устройства с пневматической подачей показаны на рис. II.1 и II.2. Первое из них является эжекционным, а второе — нагнетательным. Эжекционные устройства более дешевы, их используют для обдувки абразивными материалами поверхностей небольших деталей. Эти устройства не обеспечивают высоких скоростей абразивных частиц и не позволяют получать достаточную шероховатость поверхности у таких твердых материалов, как, например, чугун. Нагнетательные устройства имеют бо́льшую производительность, их можно применять для придания шероховатости твердым поверхностям. Устройства с центробежной подачей абразива используют только на поточных линиях. Это делается для обеспечения их рентабельности, поскольку они являются наиболее дорогими устройствами [15].

При использовании одного и того же абразивного материала и одного и того же сопла дробеструйного устройства с увеличением давления сжатого воздуха повышается производительность процесса обдувки. С ростом размера частиц абразивного материала производительность обдувки также возрастает. Однако при этом увеличивается расстояние между выступами или впадинами шероховатой поверхности. Поэтому обычно используют смесь, состоящую из мелких и крупных зерен. На технологию дробеструйной обработки оказывают влияние вид абразивного материала, форма и размеры его частиц, требования, предъявляемые к свойствам наносимого покрытия, и другие факторы [15].

К химическим способам подготовки поверхности относятся обезжиривание растворителями, фосфатирование, промывка в щелочах, травление в разбавленных кислотах.

Обезжиривание металлических изделий в зависимости от степени загрязненности проводят органическими растворителями (бензином, ацетоном, уайт-спиритом), эмульсионными составами и водно-щелочными растворами, например, следующего состава (г/л): сода кальцинированная — 50, едкий натр — 10, тринатрийфосфат — 30. Температура раствора — до 303 К, продолжи-

тельность процесса — не менее 300 с. Применяют и другие обезжиривающие составы. Обезжиренные изделия промывают горячей водой до 353 К, затем холодной проточной водой и направляют на травление. Промытые изделия сушат и направляют на фосфатирование [20, 22, 24].

Для повышения эффективности обезжиривания проводят дополнительно электрохимическое обезжиривание или применяют ультразвук [33].

Качество обезжиривания на последней стадии контролируется методом, основанным на свойстве менее благородных металлов вытеснять более благородные из их солей. Для различных металлов применяют различные растворы солей. Например, для латуни и меди используют раствор нитрата ртути, для черных металлов и алюминия — раствор сульфата меди. На поверхности изделия при хорошем обезжиривании образуется тонкий равномерный слой более благородного металла (меди или ртути), при недостаточном обезжиривании металл не выделяется на поверхности. Для получения высококачественных полимерных покрытий необходимо, чтобы выделившийся металл образовывал равномерный слой [24, 27, 33].

Для оценки качества обезжиривания можно рекомендовать люминесцентный метод, основанный на способности органических соединений (масел) флуоресцировать в ультрафиолетовом свете. Изделие погружают в органический растворитель, содержащий 1—2 кристаллика флюоресцентного красителя (на 100 л растворителя), после чего осматривают его поверхность под кварцевой лампой. Плохо обезжиренные участки образуют темные пятна на однородном фоне. Этот метод обладает большой точностью и пригоден для оценки качества в тех случаях, когда требуется высокая степень обезжиривания [33].

Для удаления слоя оксидов с поверхности металлов наиболее широко применяются травление в растворах кислот и солей и обработка кислотными пастами. Состав травильного раствора или пасты зависит от природы обрабатываемого металла. Так как процесс электрохимически инициированной полимеризации (или сополимеризации) чувствителен к микропримесям, находящимся на поверхности металла, то в ряде случаев целесообразно вместо химического травления проводить электрохимическое травление или сочетать химическое травление с обработкой ультразвуком [31—33]. После операции химического или электрохимического травления изделие необходимо тщательно промыть обессоленной водой, так как следы электролита на поверхности могут влиять на качество формируемых покрытий, а также вызывать нежелательные побочные реакции. Контроль промывных вод, стекающих с поверхности, осуществляется по их электрической проводимости [24, 33].

Чтобы поверхность металла не окислялась при нагреве изделия до температур около 553 К, применяют фосфатирование,

производимое после пескоструйиой обработки. Фосфатнроваине поверхиости перед напылением повышает прочиость сцеплення полиамидиой плеики с металлом примерно на 40 %. После фосфатировация детали промывают проточиой холодиой водой, иейтрализуют 2 %-м раствором кальциированиой соды н после повторной промывки водой выдерживают в сушильном шкафу в течеиие 1—2 ч при температуре 393 К. Помимо улучшеиия сцепления пластмассовой плеики с металлом фосфатироваиие способствует защите от коррознн металлнческой поверхиости под тоиким слоем пластмассового покрытия [20, 22].

Электрохимнческая очистка изделнй осуществляется в щелочиых растворах при воздействии постоянного нли переменного электрического тока. Электролитами могут служить гидроксид иатрия, фосфат натрия, циаиид калня или иатрия, карбоиат иатрия. Одним электродом является сам щелочиой раствор, а вторым — стальиые иикелированиые пластиикн. В процессе электролиза выделяется газ, который способствует отрыву капель масла от поверхиости металлического изделия [20].

Электрохимический метод почти иепримеиим для очистки изделий сложиой коифнгурацни. В этом случае рекомеидуется ультразвуковой метод очнстки, который осуществляется на ультразвуковой установке при помощи органнческих растворителей илн щелочиых растворов. Этим способом обезжнрнваются сравнительио небольшие изделия сложной конфигурации. Ультразвуком очищают также от ржавчины, окалины и других загрязиеий. Продолжительиость обезжириваиия в оргаиических растворителях протекает в 40, а в щелочиых растворах почти в 100 раз быстрее, чем при других методах обезжириваиия [20, 24].

Предварительная обработка иекоторых неметаллических материалов. Напыление можно производить ие только иа металлы, но и иа другие, самые разиообразные материалы: ткаиь, бумагу, дерево, гипс, пластмассы, стекло, резиу н т. д. На эти материалы возможио производить иапылеиие различиыми пластмассамн, а также производить их металлизацию, т. е. наиоснть покрытня из металлов и сплавов (алюмииия, цинка, олова, меди, магиия, чериых металлов, свиица н т. д.). Можио иапылять различные материалы в иесколько слоев, что позволяет получать покрытия со специальиыми характеристиками. Техиология иапылеиия на каждый из этнх материалов имеет свои особенности. Здесь мы рассмотрим особеииости предварительиой обработки такнх материалов [15, 35].

Ткаиь и бумага. Перед иапылением ткаиь достаточио просушить. На бумагу напылеиие лучше производнть без предварительной обработки, не подвергая ее глянцеваиию. На глянцевую бумагу и целлофаи можио напылять цииковые покрытия. При иапылеиии скорость перемещения этнх материалов должиа быть высокой, а расстояиие, с которого производится напылеине, должио составлять 250—300 мм. Если сцепление циикового по-

крытия с основой получается недостаточным, можно провести предварительное напыление олова. На этот подслой можно напылять различные материалы [15].

Дерево. Перед нанесением покрытия дерево или фанеру тщательно просушивают и поверхность обрабатывают наждачной бумагой.

Если такая обработка не обеспечивает удовлетворительной шероховатости поверхности, в качестве предварительной обработки можно произвести обдувку корундом при низком давлении сжатого воздуха. На дерево можно напылить тонкий слой цинка или олова, который в дальнейшем может служить подложкой для напыления других материалов [15].

Гипс. Покрытия на гипс напыляются сравнительно просто. Напыление необходимо проводить сразу после сушки гипсовых изделий, не подвергая их предварительно вощению, так как воск препятствует сцеплению напыляемых материалов с основой. Изделия из твердого гипса можно предварительно обработать путем обдувки легкими частицами корунда при низких давлениях сжатого воздуха.

Пластмассы. Перед напылением покрытий изделия из термореактивных пластмасс необходимо предварительно просушить. Сушку производят электрическими нагревателями при температуре, не превышающей 388 К, в течение 2—3 ч. Для обеспечения более прочного сцепления покрытия с основой можно перед нанесением покрытия произвести легкую обдувку абразивными материалами. Если такая предварительная обработка не допускается, обрабатываемую поверхность можно покрыть тонким слоем растворителя, который размягчит поверхность материала. Напыление следует производить сразу, пока материал размягчен. При напылении горелку необходимо располагать на большом расстоянии от поверхности изделия [15].

Для некоторых термопластичных материалов указанные выше методы предварительной обработки применить не удается. В таких случаях на очищенную от загрязнений поверхность изделия из термопластичного материала наносят слой целлюлозного лака [15, 35].

Стекло. Предварительная подготовка поверхности холодного стекла выполняется примерно так же, как и металлов, и заключается в основном в дробеструйной обработке абразивными материалами. Предварительно обработать стекло можно также путем нанесения на его поверхность тонкого слоя эпоксидной смолы или желатинообразного раствора фенолоформальдегидной смолы, которая затвердевает под действием тепла, выделяемого при напылении [15].

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПОКРЫТИЙ

Главной задачей при изготовлении порошкообразных композиций является тщательное смешение всех компонентов, обеспечивающее максимально равномерное распределение разнородных частиц в объеме смеси (гомогенизацию). Степень гомогенизации во многом определяет качество получаемых композиций и напыленных покрытий.

Существуют четыре основных способа получения порошкообразных полимерных составов и композиций: 1) сухое смешение порошкообразных компонентов; 2) мокрое смешение — смешение компонентов в среде растворителя с последующим его испарением (лаковый метод); 3) смешение сплавлением компонентов; 4) комбинация сплавления и сухого смешения [19].

Первый способ является наиболее дешевым и высокопроизводительным, однако внешний вид получаемых покрытий и их эксплуатационные характеристики сравнительно невысокие. Основными недостатками внешнего вида покрытий нередко являются матовость и шагрень. Кроме того, порошки, изготовленные сухим смешением, склонны к разделению (сепарации) компонентов при напылении, особенно в электростатическом поле [19].

Сухим смешением получают порошки преимущественно на термопластичном связующем, исключающем или затрудняющем возможность сплавления или растворения (полиэтилен, поливинилхлорид, пентапласт, фторопласт и др.). В некоторых случаях сухим смешением изготавливают и термореактивные порошки, например эпоксидные с отвердителем, обладающим высокой реакционной способностью, который трудно ввести методом сплавления [19].

Производство эпоксидных порошков сухим смешением включает четыре технологические операции: 1) измельчение компонентов; 2) смешение отвердителя со смолой; 3) смешение всех компонентов; 4) дополнительное (если это необходимо) просеивание. Эти операции, за исключением просеивания, выполняются в шаровых мельницах или в смесителях с Z-образными лопастями. Продолжительность измельчения и перемешивания определяется преимущественно исходным и конечным размерами частиц [19, 20, 22, 24].

При *мокром смешении* все порошкообразные компоненты и растворитель перемешивают в смесителе до образования раствора со взвешенными в нем нерастворимыми частицами (наполнитель, пигменты). Затем раствор подают с помощью насоса в камеру распыления, в которую одновременно нагнетается горячий воздух. При распылении растворитель быстро испарястся, его пары конденсируют и направляют на повторное использование. Образовавшаяся воздушно-порошковая смесь поступает в сепаратор типа циклона. Происходит отделение порошка, который

далее направляется на расфасовку. Преимуществами описанного способа является отсутствие процессов дробления, измельчения и просеивания, а также высокая степень гомогенизации растворимых компонентов. Этот способ, однако, дорог и поэтому не нашел широкого применения [19, 22].

Смешение сплавлением компонентов нашло наибольшее промышленное применение. В общем виде этот метод заключается в том, что смолу, наполнитель, добавки и отвердитель сплавляют в смесителях, гомогенизируют в экструдерах или на вальцах, затем охлажденный материал измельчают и просеивают.

Один из вариантов технологического процесса изготовления полимерных порошкообразных материалов методом сплавления схематически показан на рис. II.3 [19]. В аппарат предварительного смешения загружаются все компоненты. После сухого перемешивания они поступают в двухшнековый смеситель и затем в экструдер. Из экструдера расплав композиции поступает на охлаждаемые валки, откуда по конвейерной ленте направляется на измельчение и просеивание.

Продолжительность перемешивания и гомогенизации в смесителях во многом зависит от их типа и конструкции рабочих элементов, причем для быстро отверждающихся композиций

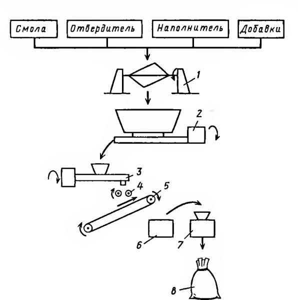


Рис. II. 3. Схема производства порошков путем сплавления компонентов и гомогенизации расплава:

1 — предварительный смеситель; *2* — двухшнековый смеситель; *3* — экструдер; *4* — охлаждаемые валки; *5* — транспортер; *6* — бункер; *7* — мельница (дезинтегратор), *8* — расфасованный порошок

допустимая продолжительность гомогенизации может составлять около 1 мин. При выборе оборудования следует учитывать также способность экструдеров или смесителей к самоочищению. Это особенно важно при производстве окрашенных композиций. Очистка оборудования может производиться различными способами — загрузкой смолы, промывкой растворителями или заменой рабочих элементов.

Комбинация сплавления и сухого смешения применяется в случае использования, например, высокоактивного отвердителя, который вводится в охлажденный измельченный сплав всех остальных компонентов. Таким же образом на последних стадиях процесса могут вводиться и пигменты. Данный способ несколько сложнее рассмотренного выше сухого смешения всех компонентов, но качество получаемых порошков выше [19, 20, 22, 24].

МЕТОДЫ НАПЫЛЕНИЯ ПЛАСТМАСС

Существует несколько групп методов нанесения покрытий на различные изделия: струйные методы напыления; напыление в псевдоожиженном слое; напыление в электростатическом поле — электрофоретическое осаждение полимеров из дисперсий (электрофорез); напыление насыпанием; нанесение расплава методом литья под давлением; плакировка металлов [19, 20, 22].

Струйные методы напыления. К ним относятся газопламенное напыление, беспламенное напыление, теплолучевой метод, нанесение покрытий из растворов, суспензий и эмульсий, центробежный метод распыления порошков, плазменный метод.

Газопламенное напыление. Сущность этого метода заключается в том, что полимер в виде порошка пропускается через пламя специальной распылительной горелки, где он расплавляется и в расплавленном виде выбрасывается со скоростью около 30 м/с струей сжатого воздуха на поверхность изделия. Попадая на поверхность изделия, частицы расплавленного порошка растекаются и сцепляются с ней, образуя однородный сплошной слой напыления. Для обеспечения хорошего качества напыления необходимо поверхность, на которую производится напыление, очистить и нагреть [22, 24]. Обычно изделие подогревают до температуры, равной температуре плавления напыляемых пластмасс. Пламя в распылительной горелке может создаваться путем использования горючих газов, таких, как ацетилен, пропан, смесь пропан — кислород, природный газ и т. д.

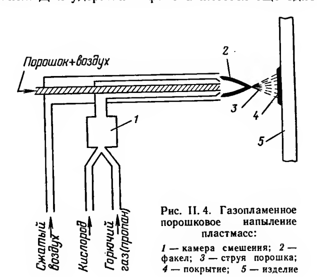
Газопламенное напыление можно производить не только порошкообразной, но и пастообразной пластмассой. При этом частицы пастообразной пластмассы, проходя через пламя горелки, нагреваются до желеобразного состояния и, попадая на поверхность изделия, образуют сплошное монолитное покрытие [20, 22]. Этот метод позволяет наносить пластмассовые покрытия

толщиной до 5 мм и более. Качество покрытия при газопламенном напылении в большой мере зависит от квалификацни исполнителя. Процесс малопроизводителен, но весьма прнгоден для ремонта поврежденных участков покрытий, особенно на тонкостенных крупногабарнтных изделиях не очень сложной конфигурации, нмеющих открытые, доступные для напыления поверхности, а также для заделкн сварных швов, устранения неровностей, вмятин н раковин на поверхностях различных машин при их изготовленни и ремонте. Примерный расход порошка полнмера при толщине покрытия 0,3—0,4 мм составляет 1,0—1,5 кг/ч, а производительность установки — 2,2—3,2 $м^2$/ч. Прн этом суммарный расход воздуха равен 14—16 $м^3$/ч [22].

Основным недостатком газопламенного напылення является частичная деструкция полнмера из-за неустойчивости теплового режима, что приводит к некоторым дефектам напыленного слоя. Этот недостаток устраняется при беспламенном, плазменном и теплолучевом методах напыления [20].

Нанесение газопламенным способом покрытий из пластмасс производится на специальных установках с применением горелок-распылителей. Все аппараты, прнменяемые для газопламенного напыления, работают по одному прннципу и отлнчаются только формой пламени и способом подачи полимерного матернала нз порошкового питателя к распылнтельной горелке.

На рис. II.4 приведена схема питания горелки-распылителя воздушно-порошковой смесью при газопламенном напылении пластмасс. Подача порошка производится по центральному каналу сжатым воздухом. Смесь кислорода с газообразным топливом поступает в кольцевое сопло, на срезе которого образуется факел. Для удержания факела имеется еще одно кольце-



Рнс. II. 4. Газопламенное порошковое напыление пластмасс:

1 — камера смешения; *2* — факел; *3* — струя порошка; *4* — покрытие; *5* — изделие

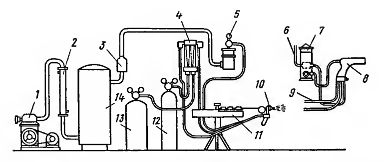


Рис. II. 5. Схема установки для газопламенного напыления полимерных материалов в виде прутка или в виде порошка:

1 — компрессор; *2* — теплообменник; *3* — осушитель; *4* — расходомер; *5* — редуктор для регулирования подачи сжатого воздуха; *6* — подвод сжатого воздуха; *7* — бункер для порошка; *8* — горелка, распыляющая порошок; *9* — шланг к расходомеру; *10* — горелка, распыляющая полимерный пруток; *11* — бухта полимерного прутка; *12* — кислородный баллон; *13* — ацетиленовый баллон; *14* — ресивер

вое сопло, из которого истекает струя сжатого воздуха. Такая конструкция горелки позволяет производить регулировку длины факела и предохраняет внутреннее сопло от перегрева [15].

На рис. II.5 представлена общая схема устройства для газопламенного напыления пластмасс. Редуктор снижает давление сжатого воздуха, поступающего из воздушной емкости, до 0,3—0,6 МПа, а осушитель удаляет из воздуха влагу и масло [15].

Отечественная аппаратура типа УПН-4, УПН-4Л для газопламенного напыления разрабатывается во ВНИИАвтогенмаше и серийно выпускается Барнаульским аппаратурно-механическим заводом.

Бесплраменное напыление. Сущность этого метода состоит в том, что струя смеси воздуха с полимерным порошком наносится на предварительно очищенную нагретую поверхность из распыляющего устройства. Отсутствие деструкции полимера при напылении, простота конструкции и универсальность устройства для напыления, а также возможность нанесения покрытий на изделия различных габаритов и конфигурации при использовании небольшого количества полимерного порошка — вот преимущества этого метода. К недостаткам можно отнести необходимость предварительного нагрева изделия, большие потери (до 50 %) распыляемого материала, невозможность получения равномерных по толщине покрытий, особенно при напылении на острые грани и невертикальные плоскости [20, 22, 26].

Для нанесения полимерных покрытий беспламенным методом на нагретые детали можно применять установки УПН-4 и УПН-4Л для пламенного метода без использования горючего газа. Все установки для беспламенного напыления порошковых материалов состоят из питателя и распыляющих головок и снабжены приборами для регулирования и контроля процесса напыления.

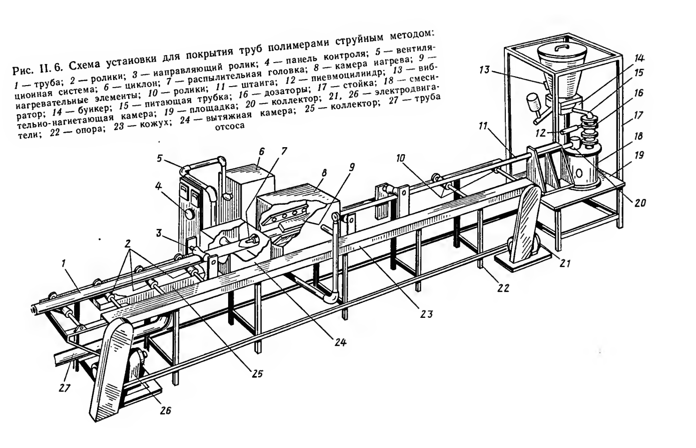


Рис. II. 6. Схема установки для покрытия труб полимерами струйным методом:

1 — труба; *2* — ролики; *3* — направляющий ролик; *4* — панель контроля; *5* — вентиляционная система; *6* — циклон; *7* — распылительная головка; *8* — камера нагрева; *9* — нагревательные элементы; *10* — ролики; *11* — штанга; *12* — пневмоцилиндр; *13* — вибратор; *14* — бункер; *15* — питающая трубка; *16* — дозаторы; *17* — стойка; *18* — смесительно-нагнетающая камера; *19* — площадка; *20* — коллектор; *21*, *26* — электродвигатели; *22* — опора; *23* — кожух; *24* — вытяжная камера; *25* — коллектор; *27* — труба отсоса

Широко применяется нанесение покрытий из порошковых полимерных материалов на наружные и внутренние поверхности труб длиной до 12 м. На рис. II.6 [22] представлена схема установки для нанесения покрытий на трубы методом напыления. Установка работает следующим образом. Труба *1*, перемещаясь вращающимися роликами *2*, проходит камеру нагрева *8* с установленными в ней тремя термоизлучающими панелями и надвигается на головку распылителя, укрепленную на штанге *11*. В камере нагрева происходит одновременно и нагрев трубы, и напыление полимера при помощи головки распылителя, расположенной на конце штанги. Штанга распылителя *11* жестко закреплена и подсоединена к коллектору *20*, через который в нее нагнетается воздушно-порошковая смесь. Порошок подается к распылителю с помощью питающей системы, включающей в себя: бункер *14*, систему вибраторов *13*, питающие трубки *15*, дозаторы *16*, а также смесительно-нагнетающую камеру *18*. Излишки порошка и газов, образующиеся после оплавления полимера, отсасываются с помощью вентиляционной системы *5* и вытяжной камеры *24* [22].

Теплолучевой метод. Этот метод во многом превосходит газопламенный: он более производителен и универсален. Сущность метода заключается в подаче потока частиц полимерного термопластичного материала в зону мощного теплового излучения, где они оплавляются и наносятся на покрываемую поверхность. Воздушно-порошковая смесь образуется в вибровихревом аппарате и через шланг направляется в ствол специального распылителя, на котором укреплены кварцевые иодные лампы типа НИК-200 [19, 24, 27].

Принципиальная схема устройства для напыления теплолучевым методом представлена на рис. II.7 [20]. Установка состоит из пистолета-распылителя *3* и питателя *1*. Основным рабочим элементом распылителя является нагреватель, состоящий из нескольких параболических отражателей *5*, в фокусах которых расположены кварцевые иодные лампы *6* типа НИК-200. В качестве питательного устройства используется аппарат вибровихревого типа, в котором создается воздушно-порошковая смесь, поступающая по шлангу *2* к щелевому распылителю *4*. Рефлекторы укреплены шарнирно и могут поворачиваться на определенный угол для наиболее целесообразного регулирования фокусировки суммарного потока. Установка имеет электрорегулирующее устройство (на схеме не показано), позволяющее изменять интенсивность теплового потока в широком диапазоне. Для увеличения производительности в одном агрегате может использоваться большее число ламп [19, 20, 22, 24].

Теплолучевой метод в 1,5—1,8 раза более эффективен, чем пламенный, обеспечивает на 25—30 % сокращение расхода порошка при меньшей энергоемкости процесса. Покрытия, нанесенные этим способом, имеют более высокие физико-механические характеристики и лучшую адгезию к поверхности изделия. Кроме

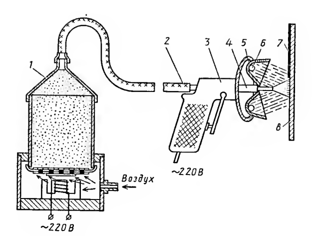


Рис. II. 7. Схема установки для теплолучевого напыления:

1 — порошковый питатель; *2* — шланг для подачи воздушно-порошковой смеси; *3* — пистолет-распылитель; *4* — щелевой распылитель; *5* — параболический отражатель; *6* — кварцевая лампа; *7* — полимерное покрытие; *8* — покрываемое изделие

того, теплолучевое напыление может применяться для нанесения покрытий как в инертных, так и во взрывоопасных средах, так как в этом случае нет открытого пламени.

Недостатком метода являются значительные потери порошкового материала при напылении, а также загрязнение воздуха. Этого недостатка лишены методы струйного напыления в электрическом поле [20, 22, 34, 37].

Нанесение покрытий из растворов, суспензий и эмульсий. Свойства (особенно адгезионная прочность) покрытий, получаемых из растворов, зависят как от состава, так и от концентрации полимера в растворе и толщины покрытия. Концентрация полимера в растворе должна быть в пределах 15—30 %. При малой концентрации приходится прибегать к многократному нанесению покрытий (до 20 слоев), а при концентрации свыше 30 % получаются слишком вязкие растворы [20].

Растворы наносятся кистью, распылительными устройствами, погружением изделия в ванну с раствором или наливом его на изделия. После нанесения раствора растворитель из него удаляется. Для каждого конкретного раствора имеется своя оптимальная скорость испарения растворителя [22].

Наиболее высокие прочность и теплопроводность напыленной пленки характерны для покрытий, полученных из раствора полистирола в ксилоле, а наименьшие значения этих показателей — для покрытий, полученных из раствора полистирола в тетрахлориде углерода (четыреххлористом углероде).

Наряду с термопластами для получения покрытий из растворов применяют термореактивные полимеры, например феноло-

формальдегидные смолы, которые в виде раствора в этиловом спирте наносятся в 3—4 слоя общей толщиной 0,3—0,6 мм. Наносимый слой сушат при 293 К в течение 2 ч, затем протекает процесс полимеризации в течение 24 ч при повышении температуры от 313 до 403 К [20, 24, 26].

Суспензии и эмульсии обладают рядом свойств, обеспечивающих получение качественного полимерного покрытия. Они готовятся из полимеров, не растворяющихся в обычных растворителях, или труднонапыляемых порошкообразных полимеров.

Суспензии готовят из фторопластов, а эмульсии — на основе кремнийорганических полимеров. Суспензии должны содержать 60—70 % мелких частиц — размером до 0,5 мкм, остальное должны составлять частицы размером от 0,5 до 10 мкм. Во избежание коагуляции суспензии и эмульсии стабилизируют поверхностно-активными веществами. Суспензии и эмульсии наносятся кистью, распылением, окунанием в них изделия или наливом на поверхность. Суспензии и эмульсии готовят из фторопластов, пентапласта, поливинилхлорида, синтетических каучуков и полиэтилена.

Толщина покрытия зависит от концентрации и вязкости суспензии или эмульсии. С увеличением вязкости возрастает толщина покрытия. Однако покрытия большой толщины склонны к образованию трещин. Для получения качественного покрытия применяют многократное нанесение, причем толщина первого слоя не должна превышать 10—20 мкм. При последовательном повторении операции нанесения можно получить покрытие толщиной до 200 мкм [20, 22, 24]. Наиболее современными методами нанесения суспензий, эмульсий и раствора на металлические изделия являются методы нанесения в электрическом поле, в частности электрофоретическое осаждение полимера на поверхности изделия, при котором покрываемый металл служит катодом [20].

Центробежный метод распыления порошков. При этом методе порошок от дозирующего устройства подводится к дискам, вращающимся в горизонтальной плоскости в противоположных направлениях. Порошок, попадая на диски, распыляется под действием центробежных сил, образуя плоскую струю. Для осаждения частиц на деталь, как правило, используется электрическое поле. Диски могут перемещаться вдоль вертикальных осей вращения, в результате чего получается достаточно объемная зона напыления, через которую пропускают детали [19, 24].

Плазменный метод. При этом методе напыления покрытий порошковый полимерный материал нагревается от ионизированного газа (аргона, гелия, азота, водорода и др.), который выходит из плазменной горелки струей с температурой около 10 000 К. Порошок перемещается потоком газа в плазменной дуге и наносится специальной плазменной горелкой на поверхность детали [15, 19].

Принципиальная схема установки для плазменного напыле-

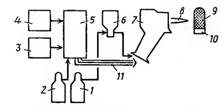


Рис. II. 8. Принципиальная схема установки для плазменного напыления:

1 — газ, транспортирующий порошок; *2* — рабочий газ; *3* — охлаждающая вода; *4* — источник электроэнергии; *5* — пульт управления; *6* — порошковый питатель; *7* — плазменный распылитель; *8* — плазменная струя; *9* — напыляемое покрытие; *10* — подложка; *11* — подвод к распылителю напыляемого порошка, электроэнергии, рабочего газа, воды, охлаждающей распылитель

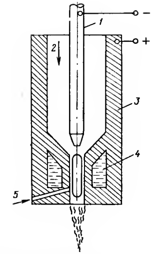


Рис. II. 9. Схема плазменного распылителя-горелки:

1 — вольфрамовый электрод; *2* — плазмообразующий газ; *3* — сопло; *4* — охлаждающая жидкость; *5* — газ, несущий порошок

ния приведена на рис. II.8 [15], а схема плазменного распылителя-горелки — на рис. II.9 [19]. Порошковый материал вводят в струю плазмы под определенным углом, зависящим от температуры плавления частиц порошка. Температуру струи можно менять в широком диапазоне, варьируя диаметр сопла и режимы работы распылителя. Этот метод имеет преимущества перед газопламенным напылением: покрытия получаются с меньшей пористостью, более равномерные, обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с поверхностью деталей. Так как в качестве рабочего газа используется инертный газ, то в расплавленном порошке и в напыляемом покрытии окисления не происходит. Недостатками этого метода являются высокая стоимость оборудования и большие затраты на его эксплуатацию; кроме того, процесс сопровождается шумом и ультрафиолетовым излучением. Для достижения высокой производительности напыление следует осуществлять при небольшом расстоянии от горелки до поверхности изделия (75—150 мм) [15, 19, 24, 35].

Однородные толстые покрытия необходимо напылять за несколько проходов. Толщина покрытия, достигаемая за один проход, составляет 150—250 мкм. Мощность плазмотронов, используемых для напыления, равна 20—40 кВт (40 % мощности теряется на охлаждение горелки). Поверхность изделия, как правило, не подогревают. Лишь в некоторых случаях производят предварительный подогрев с целью удаления влаги и увеличения прочности сцепления покрытия с поверхностью изделия. Такой подогрев осуществляют плазменной струей без подачи в нее

иапыляемого порошка. Нагрев изделия при этом не превышает 400 К.

При плазмеином напылении особое внимание обращается иа равиомериость и иепрерывиость подачи порошка в горелку. Для этой цели используют шпатель. Засасывание порошка из буикера штателя траиспортирующим газом, например аргоиом, производится между иагнетательиой и всасывающей трубами; по питающей трубе порошок равиомерио подается в горелку. В качестве рабочего газа рекомендуется использовать смесь азота с 5—10 % водорода. Такой газ практически ие взаимодействует с иапыляемыми материалами, дешев и интеисивио передает тепло иапыляемому порошку. Для иапылеиия материалов, которые вступают в реакции с азотом, используется смесь аргоиа с 5—10 % водорода или (в большиистве случаев) чистый аргои [15].

Несмотря иа высокую температуру газа, полимер ие разлагается благодаря иаличию иеертиой среды и иезиачительиой продолжительности коитакта порошка с плазмой. Этим методом можио иапылять практически все полимеры. Особеиио целесообразио использоваиие его для иапылеиия фторопластов [15, 19, 20, 24]. Возможио примеиеиие его при ремоите поврежденных поверхиостей, ликвидации сколов, трещии, отслоений. Такие дефекты невозможно исправить какими-либо другими способами. В Белорусском институте железиодорожиого траиспорта и НПО «Биохимреактив» (г. Миием) разработаи и виедреи в практику метод ремонта аппаратов, покрытых стеклоэмалью, с помощью плазмениого иапылеиия. Обнаруженную оголеиную металлическую поверхиость зачищают абразивиым кругом, подвергают пескоструйиой обработке, обдувают сжатым воздухом и обезжиривают ацетоиом. После этого с помощью плазмеиной горелки иаиосят слой иеорганического материала толщииой 0,5—1,5 мм (оксиды алюминия и циркоиия или коррозионно-стойкие сплавы), а поверх иего, расплавляя в плазмеииой струе порошок полимера (пентапласт или фторопласт), иапыляют тонкий (100—250 мкм) полимериый слой. Такое двухслойное покрытие отличается хорошей адгезией к металлу, оио практически ие содержит пор и поэтому иадежио защищает металл от разрушеиия.

Напыление в псевдоожиженном слое. Разновидиостями этого метода являются вихревой, вибрациоииый, вибровихревой, пиевмовибрациоииый методы иапылеиия.

Вихревой метод напылеиия. При вихревом напылении в специальиых ваинах или сосудах за счет продуваиия воздуха образуется псевдокипящий (взмучеииый) слой полимерного порошкового материала, в который опускают предварительио очищеииое и иагретое изделие. Для иекоторых изделий с развитой поверхиостью после иаиесеиия покрытия требуется последующий дополиительиый нагрев для обеспечеиия лучшего растекаиия расплавлеиного полимера, а следовательио, для получеиия одиородиого, равиомериого по толщине покрытия [16, 19].

Взвешенный слой порошка образуется вследствие давления на него газа (воздуха, азота и др.), поступающего снизу через пористую перегородку. Когда перепад давления по высоте слоя становится достаточным для поддержания всего слоя порошка во взвешенном состоянии, начинается псевдоожижение — образуется турбулентный кипящий слой, создающий гидростатический напор. Равномерность кипения псевдоожиженного слоя в большой мере зависит от однородности порошка [22]. Чтобы воздух свободно не прорывался сквозь слой порошка, толщина слоя должна быть не менее 100 мм. Чем мельче порошок, тем больше будет степень его разбухания.

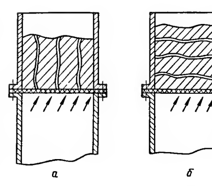
Обычно порошок переходит в псевдоожиженное состояние с появлением воздушных каналов и прослоек (рис. II.10), образующихся в результате прохождения через зазоры между частицами слишком большого количества воздуха, оказывающего ожижающее действие, и при применении влажного порошка или мелких частиц, склонных к агломерации [20, 24]. С увеличением размера частиц от 60 до 370 мкм интенсивность каналообразования повышается на 45 % [24]. Слой, состоящий из частиц меньшего размера, переходит в псевдоожиженное состояние при меньшей скорости продувки воздуха.

Изделия перед нанесением покрытия нагреваются; в них создается запас тепла, необходимый для расплавления и растекания полимера [39]. Качество покрытия, его сцепляемость с металлической поверхностью, толщина слоя и другие характеристики в значительной степени зависят от температуры предварительного нагрева изделия. Изделие нагревается равномерно по всей поверхности. Повышение температуры улучшает качество покрытия, способствует более полному оплавлению частиц, но оно ограничивается термической деструкцией полимера, приводящей к значительному уменьшению прочности, эластичности, износостойкости, адгезии к металлу. Температура нагретой детали к моменту нанесения покрытия должна не менее чем на 300—385 К превышать температуру растекания пластмассы.

Нагрев изделий производят в электрических нагревательных печах, в высокочастотных установках или инфракрасными лучами. Установки для нагрева снабжены аппаратурой для автоматического поддержания требуемой температуры. С целью предотвращения окисления поверхности изделия при подогреве и оплавлении целесообразно применять сушильные шкафы с вакуумом или нейтральными средами.

Толщина напыленного слоя при прочих равных условиях зависит от продолжительности нахождения нагретого изделия в псевдоожиженном слое [40, 41]. Так, для получения покрытия из полиамида П-68 толщиной 0,2—0,3 мм изделие должно находиться во взвешенном слое 2—5 с. Толщина покрытия увеличивается при повышении температуры нагрева изделия, причем это увеличение происходит до определенного предела.

Рис. II. 10. Образование каналов (*а*) и воздушных прослоек (*б*) при переходе неподвижного слоя полимерного порошка в псевдоожиженное состояние



При быстром охлаждении покрытий из поликапролактама образуется аморфная фаза, которая обусловливает эластичность покрытий, их гибкость и высокую ударную вязкость. При медленном охлаждении создаются условия для кристаллизации покрытия, что повышает их разрывную прочность, жесткость, твердость и износостойкость [20, 24]. Медленное охлаждение покрытий уменьшает вероятность их отслаивания от металлического основания и способствует снятию внутренних напряжений, возникающих в слое из-за различия коэффициентов термического линейного расширения пластмассы и металла.

Преимуществом вихревого напыления является то, что этот метод прост, в несколько раз производительнее, чем газопламенный и другие струйные методы. Так, при напылении внутренней части трубы газопламенным методом производительность процесса нанесения покрытия без учета времени на предварительный нагрев и последующее охлаждение составляет 1,2—1,5 $м^2/ч$ при толщине покрытия 0,5 мм, а при вихревом методе процесс напыления покрытия (пребывание изделия в верхней части вихревого аппарата) продолжается максимум 50 с независимо от площади и габаритов изделия. Весь процесс, за исключением операций по предварительной очистке поверхности изделия (т. е. нагрев изделия в нагревательном устройстве, перенос его в вихревой аппарат, выдержка в нем, выемка из аппарата и оплавление), продолжается 30—50 мин [20].

Метод позволяет наносить покрытия на детали сложной геометрической формы при 100 %-м использовании порошкового материала. Так, для получения покрытия толщиной 0,25 мм на поверхность, равную 1 $м^2$, требуется примерно 0,25—0,35 кг порошка. Процесс легко автоматизируется и механизируется. Возможно получение покрытий толщиной 100—500 мкм за один технологический прием, а также более толстых покрытий путем повторения операций напыления — оплавления [20, 22, 42].

Основными недостатками вихревого метода напыления являются необходимость создания громоздкого оборудования для крупногабаритных изделий, а также технологические трудности, возникающие при покрытии деталей, имеющих неодинаковую толщину в разных сечениях или малую толщину (менее 1 мм). К недостаткам данного метода можно отнести также необходи-

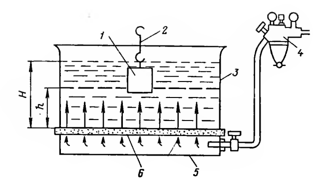


Рис. II. 11. Схема установки для вихревого напыления:

1 — нагретая деталь; *2* — подвеска для погружения детали в сосуд; *3* — сосуд (ванна); *4* — регулятор давления; *5* — нижнее днище; *6* — пористая перегородка

мость применения порошков с хорошей сыпучестью и сравнительно узким распределением гранул по размерам, трудность создания псевдоожиженного слоя из многокомпонентных порошков и трудность получения покрытий толщиной менее 100 мкм [20, 24].

Вихревое напыление порошковых полимерных материалов (рис. II.11) производится в специальных сосудах (ваннах) различной конфигурации. В комплект установки для нанесения покрытий вихревым способом помимо сосуда входят: источник сжатого воздуха или азота, регулятор давления, маслоотделитель, механизм для передвижения детали (транспортировки, опускания и подъема детали из сосуда), электроталь, конвейер, тельфер, печь для нагрева детали и печь для оплавления покрытия [24, 40, 42].

Сосуд (ванна) круглого или прямоугольного сечения имеет два днища (см. рис. II.11) [16]. Нижнее днище *5* сплошное, а верхнее *6* изготавливается из микропористого материала. Сосуд можно изготавливать из листовой стали или другого воздухонепроницаемого материала (стекла, пластмассы, древесины). На верхнее днище, которое называют перегородкой-фильтром, укладывают слой порошка напыляемого материала высотой *h*. В пространство между верхним и нижним днищами подается под давлением воздух или азот. Сжатый воздух проникает через поры перегородки в лежащий на ней порошок и взмучивает его. За счет этого над перегородкой образуется слой взвешенного порошка высотой *H*. Высоту слоя взвешенного порошка регулируют путем изменения давления сжатого воздуха регулятором *4*. Деталь *1*, на которую наносится покрытие, вводится в сосуд на специальной подвеске *2*. Камеры разделяются пористой перегородкой-фильтром, которая сверху и снизу защищена металлической решеткой, предотвращающей продавливание пористой перегородки сжатым воздухом или случайные повреждения сверху при напылении пластмасс на

тяжелые изделия. Камеры плотно соединены болтами между собой, чтобы воздух не проходил между ними. Пористая перегородка ванны должна обеспечивать равномерное распределение подаваемого воздуха по сечению ванны и выдерживать давление до 0,5 МПа. Изготавливают перегородки из микропористого винипласта толщиной 2—3 мм, из стеклоткани, пористой фильтрующей керамики, войлока толщиной 30—40 мм, из мелких металлических сеток, сложенных в несколько слоев, и т. д. Для предохранения пор от засорения пористые перегородки обертывают плотной тканью. Засорившиеся пористые перегородки можно очищать, пропуская через них воздух. Защитные металлические решетки изготавливают из листовой стали толщиной от 3 до 6 мм (в зависимости от размера ванны) с большим числом отверстий диаметром от 6 до 10 мм и с шагом 15×15 мм [16, 20, 22, 24, 40]. В нижнюю закрытую камеру подается сжатый воздух или азот от воздушной магистрали или компрессора через масловодоотделитель и калорифер. Верхняя часть ванны, как было сказано, предназначена для образования псевдоожиженного слоя порошка. Необходимое давление воздуха колеблется от 0,01 до 0,5 МПа в зависимости от габаритов сосуда и определяется суммой сопротивлений подводящих трубок, воздушной камеры, пористой перегородки и взвешенного слоя порошка.

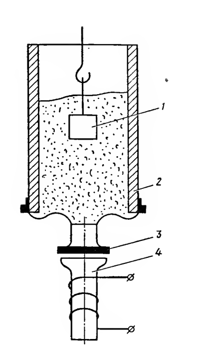
Подача воздуха регулируется так, чтобы создать в аппарате взвешенный слой, примерно в 1,2—1,7 раза превышающий по высоте насыпанный слой порошка. Перепад давления в псевдоожиженном слое численно равен весу столба взвешенного порошка, приходящегося на единицу площади поперечного сечения слоя.

Высота аппарата обусловливается габаритными размерами изделий и при необходимости может быть увеличена дополнительными надставками.

Для улавливания пластмассовой пыли и уменьшения потерь порошка целесообразно применять бортовой отсос, для чего в верхней части сосуда закрепляют кольцевую насадку, соединенную с пылесосом. Для отсоса пыли в аппарате предусмотрены специальные отсеки с козырьками. Отсасываемый вентилятором воздух, проходя через матерчатые фильтры, очищается от пыли и вновь подается в аппарат [20, 22].

Вибрационное напыление осуществляется двумя способами. Сущность первого заключается в том, что предварительно очищенное и нагретое изделие контактирует с порошкообразным полимером, находящимся в псевдоожиженном состоянии, достигнутом в результате вибрации. Переход порошкообразного полимера в псевдоожиженное состояние происходит за счет сообщаемых сосуду (ванне) с порошком вибрационных колебаний соответствующей частоты (50 или 100 Гц) и ускорения.

Сущность второго метода состоит в том, что порошок в сосуде неподвижен, а изделие, погружаемое в него, вибрирует. В резуль-



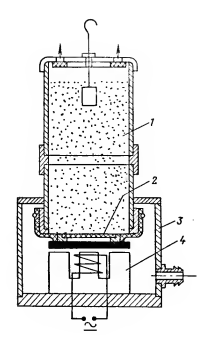


Рис. II. 12. Аппарат для вибрационного напыления:
1 — изделие; *2* — рабочая камера; *3* — якорь; *4* — упругая мембрана

Рис. II. 13. Аппарат для вибровихревого напыления:
1 — рабочая камера; *2* — пористое вибрирующее дно; *3* — воздушная камера; *4* — вибратор

тате достигается эффект псевдоожиженного слоя. Однако качество покрытия в этом случае получается неудовлетворительным [20].

При вибрационном напылении применяются в основном два варианта аппаратов. В первом варианте аппарат для вибрационного нанесения покрытий (рис. II.12) [22] устанавливается стационарно. Под действием вибратора дно камеры колеблется, вследствие чего порошок переходит в псевдоожиженное состояние [22]. Во втором варианте аппарат с жестким дном монтируется на амортизаторах, и псевдоожиженное состояние порошкового материала достигается в результате вибрации всего аппарата.

При вихревом и вибрационном способах нанесения покрытий не удается достичь равномерного распределения частиц порошка различных фракций в объеме псевдоожиженного слоя, что не позволяет получать равномерные по толщине покрытия. Это объясняется тем, что при вихревом способе нанесения покрытий наиболее мелкие частицы выносятся в верхнюю часть псевдоожиженного слоя, а крупные остаются в нижней части. При вибрационном нанесении картина обратная: более крупные частицы,

приобретая бо́льшую кинетическую энергию, попадают в основном в верхнюю часть слоя, а частицы с меньшей массой остаются внизу [27].

Метод вибровихревого напыления разработан в институте механизации металлополимерных систем АН БССР академиком В. А. Белым и его сотр. [24, 26]. Этот метод имеет преимущества перед вихревым и вибрационным методами, так как, осуществив одновременное воздействие на порошкообразный материал вибрации и восходящего потока газа, удается избежать недостатков, присущих каждому из этих методов в отдельности.

Сущность вибровихревого метода напыления заключается в том, что псевдоожижение достигается за счет одновременного воздействия на порошкообразную пластмассу сжатого воздуха или газа и вибрации. При этом мелкодисперсный полимерный порошок засыпается в аппарат (рис. II.13) [22] и под действием восходящего потока сжатого воздуха, подаваемого через пористую перегородку под давлением, и вибрации переходит в псевдоожиженное состояние. Затем предварительно обработанную и нагретую деталь опускают в сосуд. Порошок оседает на поверхности детали, расплавляется на ней и растекается, образуя ровное и гладкое покрытие. В этом случае используются полимерные порошки различного гранулометрического состава, а также комкующиеся и плохосыпучие полимерные порошки. Изменяя величину вибрации и расход газа, удается почти для всех полимерных материалов получить хорошее псевдоожижение [20, 22, 24].

Вибровихревой метод имеет следующие преимущества перед вихревым и вибрационным методами: равнотолщинность напыляемого покрытия по всей поверхности изделия; возможность получения больших толщин покрытия; стопроцентное использование порошкообразного полимерного материала; хорошая ожижаемость смеси полимерного порошка с наполнителями; возможность работы в различных режимах напыления и получения сплошного покрытия.

Пневмовибрационный метод предоставляет возможность плавного изменения частоты и амплитуды колебаний. Его достоинства заклю-

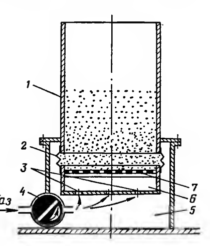


Рис. II. 14. Аппарат для пневмовибрационного напыления:

1 — рабочий резервуар; *2* — сильфон; *3* — дросселирующие отверстия; *4* — пневмопрерыватель; *5* — камера пульсирующего давления; *6* — газовая камера; *7* — пористое дно

чаются также в отсутствии электрооборудования, простоте конструкции, надежности и безопасности в работе.

В институте механики металлополимерных систем АН БССР разработан пневмовибрационный аппарат (рис. II.14) [22]. В этом аппарате порошок переводится в псевдоожиженное состояние путем продувания через него газа, подаваемого через пневмопрерыватель *4*, что вызывает пульсирующее изменение давления газа под пористым дном *7* и соответственно его вибрацию. Оптимальный режим псевдоожижения наблюдается при давлении газа у пневмопрерывателя около 0,05 МПа и частоте вибрации 50 Гц.

Таким образом, создание псевдоожиженного слоя порошка вибровихревым и пневмовибрационным методами дает возможность получать качественные покрытия из порошкообразных полимерных материалов. Но этими методами невозможно наносить порошкообразный полимер на поверхность холодного изделия. Это осуществляется только при нанесении покрытия в электростатическом поле. Для нанесения полимерных покрытий на изделия погружением последних в псевдоожиженный слой используются конвейерные установки, которые нашли широкое распространение на машиностроительных и вагоностроительных заводах [40, 42].

На рис. II.15 [22] показана принципиальная схема установки для вихревого напыления. Установка позволяет наносить антифрикционные и декоративно-защитные покрытия на изделия размером 400×400×1100 мм (подшипники, маховики, кронштейны,

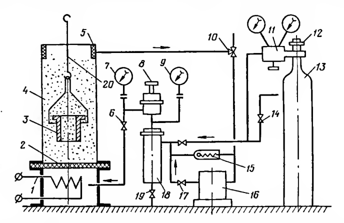
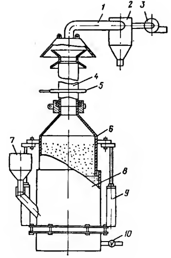


Рис. II. 15. Схема устаиовки для вихревого иапылеиия пластмассовых покрытий:
1 — газоподогреватель; *2* — порнстая перегородка; *3* — нагретая деталь; *4* — сосуд для напыления; *5* — кольцевая микропористая перегородка; *6* — вентиль подачи воздуха в напылительную камеру; *7, 9* — маиометры соответствеино до давления 0,4 и 1 МПа; *8* — регулятор давления воздуха; *10* — вентиль всасывания; *11* — регулятор давлення; *12* — запорный вентиль; *13* — баллон с азотом; *14* — вентиль воздушиой магистрали; *15* — перепускной клапан; *16* — компрессор; *17* — вентиль подачи воздуха из компрессора; *18* — масловодоотделнтель; *19* — вентиль для продувкн; *20* — механнзм для подачн детали в сосуд

Рис. II. 16. Схема установки для вихревого нанесения покрытий на внутреннюю поверхность труб:

1 — воздуховод для отсоса порошка; *2* — циклон; *3* — вентилятор; *4* — труба, на которую наносится покрытие; *5* — кольцевой нагреватель; *6* — верхняя часть камеры; *7* — приемник с патрубком для загрузки порошка; *8* — нижняя часть камеры; *9* — пневмоцилиндр; *10* — вентиль подачи сжатого воздуха



трубы, втулки, муфты и др.). Для нагрева изделий установка оборудована несколькими электрическими печами различной мощности с автоматическим регулированием температуры. Печь размещена непосредственно над отодвигающимися аппаратом напыления и оборудована тельфером для перемещения деталей.

Вибровихревой метод напыления широко применяется для защиты наружной и внутренней поверхности труб. Для защиты внутренней поверхности труб используются в основном эпоксидные порошковые композиции. Для защиты наружной поверхности труб, укладываемых в грунт, применяются полиэтиленовые покрытия.

По расположению трубы установки для нанесения покрытий на трубы разделяются на горизонтальные и вертикальные. Горизонтальное расположение предпочтительнее, так как позволяет наносить покрытия на трубы большой длины (10—12 м). Трубы длиной более 6 м в вертикальном положении покрывать вибровихревым методом нецелесообразно из-за большой высоты установки. Установки для нанесения покрытий на трубы различаются в основном только методом нагрева трубы.

На рис. II.16 [22] показана установка для вихревого нанесения покрытий на внутреннюю поверхность трубы. Труба *4* закрепляется на горловине вихревой камеры *6*, на верхний конец трубы надевается конусная крышка, соединенная гибким воздуховодом *1* с пылеуловителем-циклоном *2*. Принцип работы установки заключается в следующем. При уменьшении объема камеры за счет изменения ее высоты порошок, находящийся в камере в псевдоожиженном состоянии, устремляется в покрываемую трубу. Изменение высоты камеры осуществляется пневмоцилиндрами *9*, которые перемещают верхнюю часть камеры *6* вниз. Высоту камеры можно изменять также движением пористой перегородки. Труба нагревается кольцевым нагревателем *5*, который может быть, например, индукционного типа [24, 27, 39].

Напыление в электростатическом поле. Сущность напыления в псевдоожиженном слое порошка в условиях электростати-

ческого поля заключается в том, что холодиое изделие погружают в слой порошка, иаходящегося под воздействием коронного разряда электрического тока высокого напряжения. Частицы полимера заряжаются, под действием электрических сил перемещаются к противоположио заряженному изделию и осаждаются иа его поверхиости ровиым слоем. После этого изделие перемещается в печь, где происходит оплавлеиие полимера. В результате на поверхиости обрабатываемой детали образуется равиомерное покрытие [20, 27].

Частицы порошка, попавшие иа изделие, испытывают электростатическое притяжение к поверхности металла в течеиие нескольких дней, поэтому изделие можио переиосить в печь для оплавлеиия, ие опасаясь, что порошок ссыплется с изделия. Длительиое сохранеиие заряда частицами порошка позволяет иаиосить их иа деталь без предварительиого ее иагрева [31]. Частицы порошка удерживаются иа холодиой поверхиости с силой, пропорциоиальной величиие заряда.

Последующее оплавление порошка иеобходимо производить при следующих температурах (К):

Полнэтилен низкой плотности	473—493
Полиамид (капрон)	493—523
Поливннилбутираль	483—498
Полипропилен	443—453
Пентапласт	503—513

Обычио покрытие иаиосят иа изделие в иесколько слоев до получеиия требуемой толщииы покрытия [34]. После оплавлеиия первого слоя полимера иа него иаиосят второй, более плотиый, который при нагреве также оплавляется, и т. д.

Кроме заряжеиия частиц полимера в поле короииого разряда существуют заряжение путем механической электризации порошков при распылении, ударе и треиии (трибоэлектризация) и заряжеиие путем электростатической индукции, которая осуществляется при иаличии виешиего источника высокого иапряжения [19, 20, 24].

Электризация порошков при распылении и ударе о поверхиость, или статическая электризация, охватывает процессы, приводящие к образованию электрических зарядов в результате механических воздействий, возникающих при столкновеиии и трении (коитакте) поверхностей двух тел, а также при разрыве (разделеиии) поверхиостей твердых тел. Электризацию механическим воздействием (удар, треиие), или трибоэлектризацию, правильиее называть контактиой электризацией. Трибоэлектрический заряд появляется в месте коитакта поверхностей двух тел, при соприкосиовеиии которых создается двойиой электрический слой вследствие перехода зарядов от одного тела к другому, т. е. на двух контактиых поверхностях образуются слои электрических зарядов противоположиых зиаков.

Наиболее вероятным при контакте двух твердых тел является перенос заряда электронами, причем трибозаряд может появляться как при контакте металл — металл, так и в парах металл — диэлектрик и диэлектрик — диэлектрик. В технологических процессах напыления полимерных покрытий осуществляется контакт, как правило, в парах металл — диэлектрик и диэлектрик — диэлектрик. Для определения знака заряда при контакте между различными материалами обычно используются так называемые трибоэлектрические ряды, в которых предыдущий материал заряжается положительно при контакте с любым последующим материалом ряда: асбест, стекло, слюда, воск, эбонит, сера и т. д.

В промышленности применяются различные аппараты для напыления, принцип действия которых основан на трибоэлектрическом эффекте [19, 43]. Например, используется электризация порошка в зазоре между двумя вращающимися коаксиально расположенными металлическими цилиндрами, а также при продувании газопорошковой смеси через трубу с вращающимся внутри ротором.

При нанесении покрытий из порошковых материалов в электрическом поле можно получать равномерные по толщине покрытия на изделиях сложной конфигурации; можно наносить покрытия на изделия, изготовленные из материала, обладающего некоторой электропроводностью (в том числе на дерево, пластмассы, стекло, бумагу и т. д.), можно получать покрытия с толщиной слоя от 50 до 500 мкм. При этом отсутствует необходимость в предварительном нагреве; потери порошкового материала в процессе напыления сведены к минимуму. Достоинствами метода являются также его универсальность, высокая производительность процесса и возможность его автоматизации [20, 22, 26].

Электропроводность — основное свойство, определяющее поведение порошкового материала в электростатическом поле. Известны три вида электропроводности: электронная, ионная и молионная. При электронной (металлической) электропроводности носителями тока являются элементарные заряженные частицы — электроны. При ионной (электролитической) электропроводности носителями тока служат ионы, прохождение тока сопровождается явлением электролиза. При молионной (электрофоретической) электропроводности носителями тока являются заряженные группы молекул — молионы, прохождение тока сопровождается явлением электрофореза. Для диэлектриков наиболее характерна ионная проводимость [22, 36].

На электропроводность полимерных диэлектриков большое влияние оказывает также степень кристаллизации полимера и введение в систему различных добавок (пластификаторов, стабилизаторов, поверхностно-активных веществ и т. д.). В этом случае появляется возможность модифицировать исходный полимер и получать покрытия с заранее заданными физико-механическими и защитными свойствами [30, 32, 36].

Примеияемые для иаиесеиия покрытий в электростатнческом поле полнмеры и полнмерные матерналы, такне, как поливниилбутнраль, полнкапролактам, полиформальдегид, полнэтнлеи высокой н иизкой плотиости, фторопласт-3, полипропнлен, порошковые эпоксидные композиции н др., обладают малой электропроводностью. Удельное объемное электрическое сопротнвленне указаниых выше полимериых материалов составляет от 10^{10} до 10^{18} Ом·см. В процессе напыления электрический заряд, приобретенный частнцей порошка, ие способеи полностью «стечь» на протнвоположно заряжеиное изделие, поэтому иапыленный слой порошка за счет электрнческого прнтяжения н молекуляриых сил удержнвается иа поверхностн длнтельиое время, достаточное для перемещення изделия в иагревательиое (плавнльное) устройство, где пронзводится термообработка напыленного слоя. Метод иапылеиня в электростатнческом поле позволяет расширить область прнменеиня порошковых полимериых композиций за счет ннзкотемпературного формнровання плеикн, что нмеет существеиное значенне для нзделнй радноэлектронной, электротехинческой, деревообрабатывающей промышлеииостн н др. [33, 43].

Для иаиесення покрытнй в псевдоожнженном слое под воздействием электрического поля прнменяют также электрофоретнческий метод, который осиован на нзвестном явленнн электрофореза [36]. Метод часто иазывают иапыленнем в ноинзнрованном псевдоожижеиином слое. Электрофорез как метод нанесення полимерных покрытнй ианболее распространеи в практнке электроосаждення. Слой осажденного полнмера прн таком способе наиесеиия получается одиородиым по всему изделию, равиомерио покрывает острые граии и углы, отверстия, впаднны, выступы н другне элементы деталей сложной конфнгурацнн. Метод обеспечнвает высокую скорость процесса, позволяет контролнровать толщнну слоя, осаждать полнмер вместе с пнгмеитом и получать плотные сплошные покрытня толщнной от несколькнх микрометров до иескольких миллнметров.

Электрофорез в осиовном используется для нанесення покрытнй нз полнмеров, пленкн которых обладают высокой хнмнческой стойкостью, а наиесенне нх традицнонными методамн сложио [19, 24, 36]. Напрнмер, после нанесення покрытня полнтетрафторэтилена требуется термообработка при температуре спекання частнц полнмера. Электроосажденнем нз органнческих сред пронзводят ианесенне покрытнй из полнстнрола, полнметнлметакрнлата, полнбутнлметакрилата, нитроцеллюлозы, полнвнннлхлорндных пластнков, мочевнноформальдегндных смол и др. Указаниые полнмеры наносят отдельно нлн в композиции с другими полимерамн, напрнмер полннзобутнленом, полнметилметакрнлатом, водорастворимыми смолами [18, 21, 23, 29].

Для иаиесення антнфрнкцнонного покрытня, в состав композицнй вводят фторсодержащнй полнмер н иекоторые металлы (медь, золото, серебро, иикель) [31, 34].

Особенно ценна возможность получения методом электрофореза однослойных утолщенных химически стойких лакокрасочных покрытий. Можно получать покрытия из окисленного полиэтилена, эфиров метакриловой кислоты, поливинилацетата, полимеризационных высыхающих и полувысыхающих масел и ненасыщенных кислот, смесей полиэфиров, эпоксидных смол, ароматических поликарбоновых кислот, смесей фенолоформальдегидных и меламиноформальдегидных смол, обработанных малеиновой кислотой, ненасыщённых жирных кислот, виниловых мономеров и смесей углеводородных смол с ненасыщенными кислотами. В качестве порошковых смол применяют эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы. При нанесении этих материалов легко получают пленки толщиной 100—130 мкм. Преимуществом применения указанных материалов является также пониженный расход энергии в процессе электроосаждения [33, 34, 36].

Электрофорез широко применяют для осаждения на металлах (преимущественно на стали) лакокрасочных материалов на основе водоразбавленных полимерных связующих. Такая композиция представляет собой смесь из водорастворимого полимерного пленкообразователя и нерастворимой части (пигментов, наполнителей и пр.), которая при разбавлении водой дает эмульсии и суспензии. Именно эта нерастворимая часть и претерпевает электрофоретическое осаждение, в то время как водорастворимый полимер выделяется на электроде в результате нейтрализации макроионов [27, 28, 36].

Помимо пленкообразователей в ванне обязательно присутствуют пигменты, органические растворители и другие добавки. К пигментам, используемым в ваннах электроосаждения, предъявляются весьма жесткие требования. Пигмент, входящий в состав пленки, влияет на параметры электроосаждения и свойства покрытия: увеличивает выход по току эмали, изменяет сопротивление и толщину пленки, воздействуя тем самым на рассеивающую способность. Введение проводящих пигментов (например, технического углерода) снижает сопротивление пленки настолько, что позволяет получать методом электроосаждения двухслойные покрытия [28, 36, 38].

Основным дефектом покрытий, получаемых методом электроосаждения, являются так называемые кратеры. Причиной образования кратеров служит выделение пузырьков кислорода, которые образуются при электролизе воды. Чем интенсивнее происходит электролиз, тем больше выделяется пузырьков и тем больше вероятность образования кратеров, т. е. пор в покрытии. Повышение температуры, напряжения и плотности тока способствует образованию кратеров. Этому же благоприятствует и высокая жесткость пленкообразователей, в связи с чем в рецептуры водоразбавляемых составов включат органические растворители, которые пластифицируют осажденный материал, понижают его жесткость и способствуют коалесценции частиц [36, 42, 44].

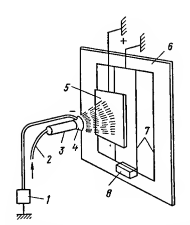


Рис. II. 17. Схема струйного напыления пистолетом в электростатическом поле

Разрабатываются следующие разновидности технологических процессов напыления полимерных покрытий в электростатическом поле: 1) с помощью пистолетов-распылителей — струйное напыление в электростатическом поле; при этом частицы порошка могут заряжаться либо на коронирующей кромке распылительной части пистолета (внешнее заряжение), либо (что менее эффективно) при пневматическом распылении порошка в межэлектродном пространстве (коронирующие электроды — изделие); 2) напыление пистолетами-распылителями без подведения высокого напряжения (трибоэлектрическими пистолетами); 3) с помощью электрофореза (в ионизированном псевдоожиженном слое); 4) напыление во взвеси («облаке») порошков над псевдоожиженным слоем с применением электростатического поля (в облаке заряженных частиц) [19, 20, 24, 40].

На рис. II.17 показан принцип работы пистолета для электростатического напыления. От высоковольтного генератора *1* напряжение по кабелю подводится к диффузору *4* распылителя, а по шлангу *2* подается воздушно-порошковая смесь. Проходя через

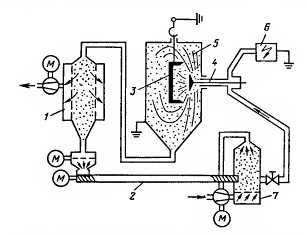


Рис. II. 18. Схема установки для напыления в электростатическом поле с непрерывной циркуляцией порошка:

1 — бункер с порошком; *2* — пневмотранспорт; *3* — изделие; *4* — пистолет; *5* — камера; *6* — генератор напряжения; *7* — аппарат для приготовления воздушно-порошковой смеси

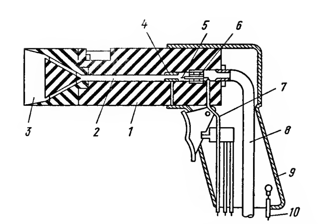


Рис. II. 19. Ручной пистолет с электрогазодинамическим генератором для напыления в электростатическом поле:

1 — корпус из диэлектрика; *2* — канал; *3* — распылительная насадка; *4* — кольцевой электрод; *5* — коронирующий электрод; *6* — центрирующая изоляционная втулка с отверстиями; *7* — кабель; *8* — трубка; *9* — рукоятка; *10* — проводник

ствол *3* распылителя, порошок заряжается на выходе из диффузора и распыляется на деталь *5*. За деталью расположены экран *6* и проволочные электроды *7* с вибратором *8*, имеющие одинаковый потенциал и улавливающие избыточный порошок [19].

На рис. II.18 приведена схема установки для напыления в электростатическом поле с непрерывной циркуляцией порошка. Изделие *3* помещается в специальной камере *5*, в которую встроен пистолет *4*, питаемый от генератора *6* напряжением 80 кВ. Воздушно-порошковая смесь приготавливается в аппарате *7*, в который порошок поступает по транспортеру *2* из бункера *1*. Неиспользованный (неосажденный на изделие) порошок направляется пневмотранспортером в бункер *1*, откуда снова по циркуляционной системе трубопровода подается в пистолет *4*. Давление воздуха в системе контролируется манометрами *М*. Установка позволяет использовать порошок практически на 100 %.

В последнее время разработаны методы нанесения тонкослойных покрытий (толщиной около 20 мкм). Это стало возможным благодаря применению тонкодисперсных порошков с частицами круглой формы и специальной системы внутреннего заряжения в распылителе. В результате применения в схеме зарядного устройства полупроводниковых приборов резко сократились габариты и масса установок, повысились их качество и надежность [34].

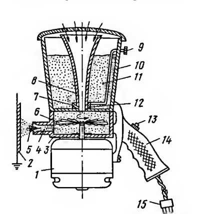
Отличительной особенностью таких распылителей является то, что зарядное устройство встроено в ствол пистолета и возбуждается напряжением 10 кВ при частоте тока 10 кГц. Номи-

нальное напряжение на выходе составляет от 70 до 100 кВ$\pm$5 % при токе короткого замыкания 0,1 мА. Пистолеты со встроенным генератором высокого напряжения характеризуются минимальной вероятностью искрообразования [24, 40].

На рис. II.19 показан пистолет-распылитель с электрогазодинамическим генератором для напыления в электростатическом поле [19].

Для автоматического напыления покрытий на крупногабаритные изделия пистолетами применяются роботы, способные передвигать пистолеты вертикально на расстояние 2,1 м.

Для напыления изделий с труднодоступными полостями и глухими отверстиями могут использоваться специальные распылители, обеспечивающие путем перемещения рефлектора сужение сечения факела вплоть до тонкой турбулентной струи. При расширении сечения факела скорость струи падает, что позволяет за счет улучшения условий осаждения получать покрытия повышенной толщины. По такому же принципу, но в автоматическом режиме работают «саморегулирующиеся» распылители, в которых сечение факела изменяется в зависимости от толщины напыляемого слоя. Для обеспечения безопасной работы используются специальные блокирующие устройства, снижающие опасность искрообразования и обеспечивающие практически одновременную подачу порошковой струи и напряжения к распылителю [19, 33, 43].



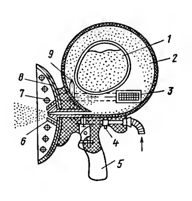


Рис. II. 20. Трибоэлектрический распылитель:

1 — микроэлектродвигатель; *2* — изделие; *3* — камера воздушно-порошковой смеси; *4* — сопло; *5* — рефлектор; *6* — вентилятор; *7* — калиброванные отверстия; *8* — диффузор; *9* — рычаг; *10* — двухстенный резервуар; *11* — порошок; *12* — кольцевая заслонка; *13* — кнопка; *14* — рукоятка; *15* — вилка

Рис. II. 21. Электростатический распылитель с трибозарядным устройством:

1 — бункер для порошка; *2* — циркуляционная камера; *3* — канал подачи газа на охлаждение рефлектора; *4* — регулятор подачи газа; *5* — корпус; *6* — распылительное сопло; *7* — нагревательный элемент; *8* — отражатель; *9* — сопло подачи газа в диффузор

Распылитель, продольный разрез которого показан на рис. II.20, работает без подведения к нему высокого напряжения. Работа распылителя основана на струйном методе напыления, а заряжение частиц осуществляется за счет трибоэлектризации. На валу высокоскоростного микроэлектродвигателя *1* имеется многолопастная крыльчатка *6*. На переднем щите двигателя укреплена камера воздушно-порошковой смеси *3*, в которой вращается вентилятор. Над камерой *3* вертикально укреплен двухстенный резервуар *10* с глухим дном. Наружная стенка резервуара выполнена в виде конуса, а внутренняя *8* образует диффузор в виде гиперболоида вращения, полость которого свободно сообщается с камерой воздушно-порошковой смеси *3*. По окружности наименьшего сечения диффузора *8* расположены отверстия *7*. Там же установлена кольцевая заслонка *12* с рычагом *9*. Диаметрально противоположно распыляющему соплу *4* с рефлектором *5* укреплена рукоятка *14* с выключателем *13* и шнуром и вилкой *15* [19].

Распылитель работает следующим образом. В резервуар *10* загружают порошкообразный материал и включают в сеть вилку *15*. Нажатием на кнопку *13* выключателя приводится во вращение вентилятор, который всасывает атмосферный воздух через диффузор *8* в камеру воздушно-порошковой смеси *3*. За счет ускоренного движения воздушной струи по диффузору и разности давлений в камере воздушно-порошковой смеси *3* и в резервуаре *10* частицы порошка *11* из резервуара *10* через калиброванные отверстия *7* стекают в полость диффузора *8* и попадают в камеру воздушно-порошковой смеси *3*. Вследствие трения частицы приобретают заряд; через сопло *4* в виде струи они нагнетаются на поверхность изделия *2*. Вместимость резервуара в исходном состоянии рассчитана на 0,5 л, но практически не ограничена из-за возможности загрузки в процессе напыления. Описанный распылитель обеспечивает получение покрытий толщиной от нескольких микрометров до 1 мм и более в зависимости от марки применяемого порошка и режима напыления.

На рис. II.21 показана другая оригинальная конструкция электростатического распылителя с трибозарядным устройством [19].

Несомненным преимуществом оборудования, в котором используется эффект трибоэлектризации, является отсутствие необходимости в специальном генераторе высокого напряжения.

На основе электрофореза и контактной электризации частиц порошка полимера в Институте механики металлополимерных систем АН БССР [20, 24] разработан струйно-электрофоретический метод напыления, который позволяет проводить процесс напыления при более низких напряжениях (10—20 кВ). Схема устройства для нанесения покрытия струйно-электрофоретическим методом приведена на рис. II.22. Сущность этого метода заключается в том, что частицы полимера, находящиеся во взвешен-

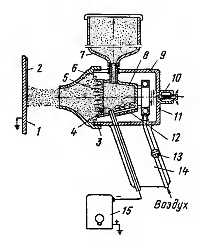


Рис. II. 22. Схема устройства для нанесения покрытия струйно-электрофоретическим методом:

1 — изделие, на которое иаиосится покрытие; *2* — полимерное покрытие; *3* — подвеска; *4* — электродиая сетка; *5* — нглоподобные эмиттеры; *6* — соплообразная насадка; *7* — бункер; *8* — внутренний рабочий резервуар; *9* — пистолет-распылнтель; *10* — перепускиой клапан; *11* — вибратор шарикового типа; *12* — микропорнстый фнльтр; *13* — кран для подачи сжатого воздуха; *14* — рукоятка; *15* — высоковольтный выпрямитель

иом состояиии, заряжаются иа электродиой сетке *4* и преодолевают сопротивлеиие мелкоячеистого фильтра *12* лишь при возиикиовеиии электрического поля между электродом и деталью *1*. На электродиой сетке *4* расположены зарядиые иглы-эмиттеры *5*, что позволяет снизить иапряжеиие источиика питания. Это устройство работает следующим образом. Заполнив рабочий резервуар *8* и питательный бачок порошкообразиым полимером, подают высокое напряжение на электродиую сетку *4*; включают подачу газа, и ои, поступая в шариковый вибратор *11*, заставляет вибрировать внутрениий рабочий резервуар *8*. Избыточиый газ выходит через клапаи *10* в атмосферу. Пистолет *9* подносят к детали *1*, которая обычио заземляется, т. е. имеет знак, обратный электродиой сетке. Вибрация рабочего резервуара *8* вызывает некоторое движеиие частиц материала через электродную сетку *4*. Частицы полимера, контактируя с заряженной поверхностью сетки и игл-эмиттеров, получают электрические заряды и увлекаются электрическим полем к поверхиости детали. Взаимодействуя между собой и с деталью, частицы образуют покрытие, которое, ие осыпаясь, продолжительиое время удерживается на поверхности, что позволяет в дальнейшем оплавить его любым из известиых способов [20, 36].

В качестве высоковольтиых геиераторов могут использоваться любые источиики, позволяющие получать иапряжеиие 10—20 кВ.

Струйные методы иanесеиия покрытия в электростатическом поле успешно примеияются для крупиогабаритиых изделий и изделий со сложиой коифигурацией в различных отраслях промышлеииости и иародного хозяйства.

Недостатком всех струйиых методов является то, что даже при наличии электростатического поля в зависимости от площади иапылеиия (габарита детали) мимо «цели» пролетает от 30 до 75 % порошка. Для экоиомии порошка и выполиеиия требоваиий

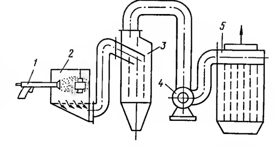


Рис. II. 23. Схема рекуперации порошка при струйном методе напыления:

1 — пистолет-распылитель; *2* — камера напыления; *3* — центробежный отделитель порошка (циклон); *4* — вентилятор; *5* — камера рекуперации с рукавными фильтрами

производственной санитарии и техники безопасности применяются специальные устройства для сбора и повторного использования (рекуперации) порошка. Эти устройства весьма эффективны, но их применение связано со значительным увеличением габаритов оборудования и занимаемой производственной площади [19].

В качестве примера отдельной рекуперационной системы может служить установка, схема которой приведена на рис. II.23. Она может быть состыкована с любыми распылительными камерами различных установок струйного напыления. Рекуператор рассчитан на максимальный расход порошка 18 кг/ч при расходе воздуха 2000 м^3/ч, так что возможность образования взрывоопасной концентрации пыли исключается. В установке применены центробежный циклон *3* типа ЦН-15 диаметром 400 мм и вентилятор *4* искрозащищенный во взрывобезопасном исполнении среднего давления. Очистка всей системы в случае необходимости смены цвета порошка занимает около 1,5 ч (с заменой рукавных фильтров на новые). Исследование фракционного состава рекуперированного порошка показало, что по сравнению с исходным

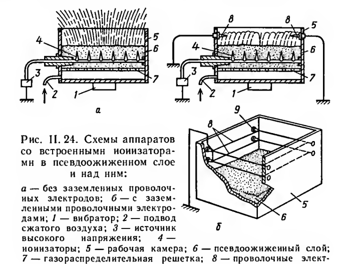


Рис. II. 24. Схемы аппаратов со встроенными ионизаторами в псевдоожиженном слое и над ним:

а — без заземленных проволочных электродов; *б* — с заземлеными проволочными электродами; *1* — вибратор; *2* — подвод сжатого воздуха; *3* — источник высокого напряжения; *4* — ионизаторы; *5* — рабочая камера; *6* — псевдоожиженный слой; *7* — газораспределительная решетка; *8* — проволочные электроды; *9* — изоляторы

в нем преобладают крупные и средние частицы, причем основная масса порошка (75 %) оседает в циклоне *3*. При некотором изменении фракционного состава порошка при повторном его использовании могут измениться условия осаждения в электростатическом поле, что вызовет необходимость их корректировки [19].

Напыление пластмасс в электростатическом поле во взвеси частиц порошка псевдоожиженного слоя осуществляют в вибровихревых аппаратах [22, 39]. Пример использования этого метода показан на рис. II.24 [5]. Такой метод дает особенно хорошие результаты при напылении тонкослойных покрытий (толщиной до 200 мкм), но легко могут быть получены и покрытия большей толщины. Высокое напряжение от генератора (40—80 кВ) подводят к специальным ионизаторам, встроенным в камеру в слое порошка. Для увеличения плотности облака и предотвращения уноса частиц за пределы камеры над уровнем слоя порошка встраиваются проволочные заземленные электроды. В целях интенсификации осаждения порошка на деталь и получения равномерных покрытий применяется вращение деталей электродвигателем в искрозащищенном исполнении (рис. II.25). Для этой цели используют импульсное включение постоянного электрического поля с продолжительностью импульсов 1,5—2,5 с и паузами 0,5—1,5 с [19]. Кроме того, применяют переключение полярности, т. е. послойно осаждается противоположно заряженный порошок.

В Ташкентском автодорожном институте разработана установка с применением электрофоретического метода напыления пластмасс в псевдоожиженном слое под воздействием электри-

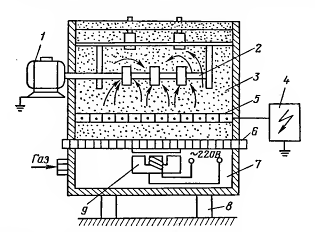
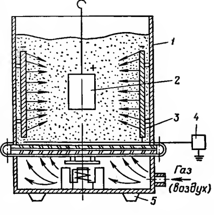


Рис. II. 25. Схема установки для напыления порошка на малогабаритные изделия в облаке частиц:

1 — электродвигатель; *2* — оправка с изделиями; *3* — облако (зона напыления); *4* — источник высокого напряжения; *5* — ионизаторы; *6* — распределительная решетка; *7* — подрешеточная камера; *8* — изолирующие стойки; *9* — электромагнитный вибратор

Рис. II. 26. Принципиальная схема электрофоретической установки для нанесения покрытий в псевдоожиженном слое:

1 — вибровихревая установка; *2* — изделие; *3* — ионизирующие электроды; *4* — источник высокого напряжения; *5* — изоляционная стойка



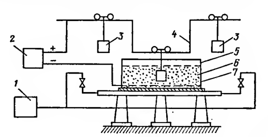
ческого поля (рис. II.26) [20, 36]. Псевдоожижение слоя порошка в этом случае можно осуществлять вихревым, вибрационным и вибровихревым методами. После получения оптимального псевдоожиженного слоя к электродам подается (от генератора высокого напряжения) отрицательный заряд высокого потенциала. Затем заземленное изделие погружают в псевдоожиженный слой. При этом частицы порошка, соприкасаясь с электродами, заряжаются контактным способом, приобретая отрицательный заряд, и под влиянием сил электрического поля перемещаются и оседают на изделии. Изделие, покрытое слоем порошка, перемещают в печь для оплавления полимерного покрытия.

Электрофоретическим способом можно произвести напыление и тогда, когда изделие находится над поверхностью псевдоожиженного слоя. В этом случае заряженные частицы притягиваются к изделию и образуют вокруг него облако, в котором и происходит напыление [20, 36, 43].

Для автоматического напыления в ионизированном псевдоожиженном слое разработана конвейерная установка (рис. II.27) [20, 22]. Среднегабаритные изделия массой до 10 кг, предназначенные для напыления, помещают в ванну *5* с полимерным порошком *6*. На ионизаторы, введенные внутрь псевдоожиженного слоя, подается отрицательный потенциал высокого напряжения. Конвейер *4* с изделием *3* заземляется. Покрытие можно наносить на холодное изделие с последующим оплавлением его в печи. Толщина напыленного слоя определяется временем пребывания изделия в ванне и напряженностью электрического поля.

Рис. II. 27. Схема установки для нанесения покрытий в ионизированном псевдоожиженном слое:

1 — компрессор; *2* — высоковольтный генератор постоянного тока; *3* — детали; *4* — конвейер; *5* — ванна; *6* — полимер в псевдоожиженном состоянии; *7* — сетка-электрод



Время пребывания и напряженность подбираются с учетом электрических свойств подложки и распыляемого материала. Для оплавления напыленного слоя применяются электрические безынерционные печи с большой отражательной способностью (например, из полированного алюминия). При использовании таких печей пропускная способность установки увеличивается примерно в 2 раза за счет сокращения времени нагрева изделий, а расход энергии уменьшается в 3—4 раза [22, 40].

Для напыления порошковых полимерных материалов в облаке заряженных частиц применяются механизированные установки; схема одной из них показана на рис. II.28 [20, 22]. В таких установках ионизаторы *6* подняты почти до поверхности псевдоожиженного слоя *5* полимерного порошка, поэтому для достижения необходимой толщины покрытия на поверхности заземленного изделия *2* достаточно, чтобы последнее прошло сквозь облако заряженных частиц. Во избежание электрического пробоя установка имеет изоляционную стойку *9*. Используя такие установки, можно полностью автоматизировать процесс напыления, проводимый с большими скоростями, и добиться исключения потерь порошка. Этот процесс применяется для напыления полимерного покрытия на проволоку, сетку, арматуру и металлические листы [20, 22, 24, 37].

Неравномерность покрытия по высоте на изделиях высотой более 150 мм может быть обусловлена сепарацией частиц порошка в межэлектродном пространстве. Толщина покрытия в верхней части изделия может оказаться в 2 раза меньше, чем в нижней. Чтобы избежать этого и получать равномерное покрытие по всей поверхности крупногабаритных изделий, применяется установка, изображенная на рис. II.29 [20, 22, 27]. Напыляемый порошковый материал загружается в камеры вибровзвешенного слоя *7* и по шлангам, соединенным с эжекторами *8*, подается в верхнюю часть распылительно-зарядной камеры *2*. Порошок при этом, проходя через систему ионизаторов *4*, распыляется и свободно осаждается на изделии *3* в камере псевдоожиженного слоя. В момент прохождения заземленного изделия через зоны напыления частицы порошка устремляются через отверстия камеры к изделию, создавая

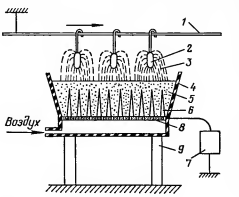


Рис. II. 28. Схема установки для нанесения порошковых материалов в облаке заряженных частиц:

1 — конвейер; *2* — изделие; *3* — силовые линии электростатического поля; *4* — ванна; *5* — псевдоожиженный слой; *6* — ионизаторы; *7* — генератор; *8* — пористая перегородка; *9* — изоляционная стойка

Рис. II. 29. Устройство для напыления порошковых материалов в электростатическом поле:

1 — конвейер; *2* — распылительно-зарядная камера; *3* — изделие; *4* — ионизаторы; *5* — источник высокого напряжения; *6* — порошковый дозатор; *7* — камера вибровзвешенного слоя; *8* — эжектор

тонкодисперсное облако заряженных частиц, и под действием сил электрического притяжения осаждаются на его поверхности [39, 43].

После оплавления создается слой, равномерный по толщине. Часть порошка, не осевшая на изделии, засасывается фильтр-отсосом в камеру вибровзвешенного слоя *7* и может быть использована вновь [24].

Методы напыления полимеров насыпанием. Все методы напыления насыпанием — полная и частичная засыпка, посыпание, центробежный метод, погружение, насыпание в электростатическом поле — применяются в основном для получения разовых покрытий. Все перечисленные процессы легко автоматизируются. Метод насыпания в электрическом поле характеризуется повышенной производительностью (не менее 200 $м^2/ч$), возможностью регулирования толщины слоя покрытия, небольшими потерями порошка и возможностью использования высоконаполненных порошковых композиций и порошков с низкой текучестью при оплавлении [19, 20, 24].

Этот метод применяется в основном для получения покрытий на внутренних поверхностях деталей и изделий с глухим дном (типа стакана). С этой целью порошковый материал насыпают в емкость (покрываемую деталь), стенки которой предварительно нагреты. Через несколько секунд порошок высыпают или отсасывают. Оставшийся на стенках порошок оплавляется и образует покрытие. Метод насыпания не позволяет получать покрытия точно заданной толщины. В то же время он чрезвычайно прост и не требует применения специального оборудования. Насыпанием через сито могут быть получены также покрытия на небольших площадях различных поверхностей, когда к толщине и равномерности покрытий не предъявляются строгие требования [19, 20, 24].

На рис. II.30 представлена установка для нанесения порошкообразных полимеров методом вибронасыпания в электрическом поле. Установка работает следующим образом. Порошок поли-

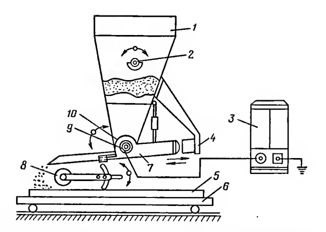


Рис. II. 30. Установка для напыления порошкообразных полимеров методом вибронасыпания в электрическом поле:

1 — бункер; *2* — опоры; *3* — генератор высокого напряжения; *4* — вибраторы; *5* — изделие; *6* — стол; *7* — лоток; *8* — ролик; *9* — коронирующий электрод; *10* — шарниры

мера из бункера *1* через регулируемую щель поступает на лоток *7*. Под действием вибрации порошок равномерно распределяется по лотку и по его наклонной плоскости ссыпается на движущееся изделие. Толщина нанесенного слоя зависит от величины щели между передней стенкой бункера и подом лотка, угла наклона лотка, интенсивности вибрации и скорости перемещения изделия; нанесенный на нагретую поверхность изделия слой порошка прикатывается роликом *8*. Усилие, прижимающее ролик к поверхности, регулируется пружинами. Такая прикатка увеличивает сплошность покрытия и усиливает его адгезию к изделию. Электрический заряд сообщается частицам порошка коронирующим проволочным электродом *9*, натянутым между шарнирами *10*, соединяющими бункер с лотком. Одновременно электрод играет роль рыхлителя порошка у выхода его из щели. Амплитуда и частота колебаний вибраторов регулируются. Тележка, на которую укладывается изделие, имеет регулируемый реверсивный привод. Такие установки применяются в домостроительных комбинатах для получения покрытий на листовых материалах шириной от 1 до 1,5 м (толщина полимерного покрытия — до 2 мм) [20, 24, 27, 42].

Нанесение расплава методом литья под давлением. Этим методом можно наносить покрытия как на новые, так и на изношенные поверхности деталей. Он отличается высокой производительностью и не требует применения последующей механической обработки покрытий, что является основным преимуществом метода [20].

Технологический процесс нанесения полимерных покрытий литьем под давлением (рис. II.31) заключается в следующем.

В рабочий цилиндр *1* литьевой машины загружают полимерный материал в гранулированном виде. Под влиянием тепла от нагревателя *2* он переходит в пластическое состояние. Движением вперед плунжера *3* продавливается свежая порция полимерного материала в зону нагрева, и одновременно расплавленная масса выталкивается через сопло запорного крана *4* в пресс-форму *5*, в которой установлена покрываемая деталь. После заполнения пресс-формы расплавленным полимером его некоторое время выдерживают под давлением для уплотнения, отвердевания и охлаждения слоя покрытия *7*. Дальнейшее охлаждение производится на воздухе или в инертной среде [20, 24]. На качество покрытия влияет температура детали и расплава. С увеличением температуры текучесть полимерного материала повышается и увеличивается адгезионная прочность покрытия. Оптимальное значение адгезионной прочности, например, поликапроамида наблюдается при температуре детали и расплава поликапроамида, соответственно равной 543 и 523 К. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению адгезионной прочности, что связано с деструкцией полимера.

Литьевое нанесение полимерного покрытия на поверхности деталей широко применяется в легкой и электротехнической промышленности (нанесение покрытий на различные валы, шпиндели, шестерни, оси, скобы, диски, опоры и т. д.) [20].

Плакировка металла. Плакировка заключается в покрывании листов металла в процессе горячей или холодной прокатки тонким слоем какого-либо другого материала (пластмасс, металла), более устойчивого к коррозии, для предохранения основного металла от разрушения и улучшения его внешнего вида. При плакировке возможно также применение клея. В этом случае на поверхность листового или пленочного материала и изделия предварительно струйным методом или методом намазывания наносится слой клея, далее дается так называемая открытая выдержка для его высыхания; затем полимерный материал и изделие прижимаются друг к другу и выдерживаются до отверждения клеящего состава [20]. Клеи, не содержащие растворителей, не требуют предварительной открытой выдержки.

Для плакировки используют листы или пленки из следующих полимерных материалов: поливинилхлорида, полиэтилена высо-

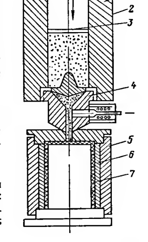


Рис. II. 31. Схема установки для нанесения покрытия из расплава полимеров методом литья под давлением:
1 — рабочий цилиндр; *2* — нагреватель; *3* — плунжер; *4* — сопло запорного крана; *5* — пресс-форма; *6* — деталь; *7* — напыленный слой

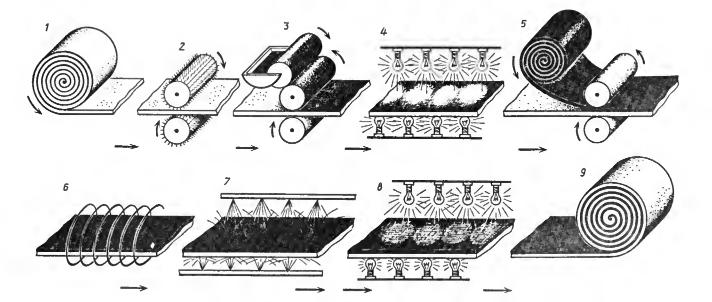


Рис. II.32. Процесс получения металлопласта:

1 — рулон стальной полосы; *2* — подготовка поверхности; *3* — нанесение клея; *4* — сушка и отверждение клеевого слоя; *5* — нанесение и обжатие полимерной пленки; *6* — термообработка; *7* — охлаждение; *8* — сушка; *9* — намотка металлопласта в рулон

кой н низкой плотности, полнизобутнлена, фторопласта, полнпропилена, полистирола, полнэфира, полиамида, резины на основе натурального и синтетического каучуков. Листы выпускаются толщиной 1—2 мм, шириной 40—1730 мм и длиной до 3 м, а пластмассовые пленки — толщиной 0,15—0,4 мм и большой длины [22, 37].

Прн наложении листовых и пленочных полимерных материалов на поверхность изделий применяются специальные приспособлення или прижимные устройства, спроектнрованные с учетом конфигурации конкретных деталей, которые удерживают их вместе прн сборке н отвержденни клея, создают необходимое давление, а иногда передают тепло или служат источником тепла.

Одной из основных предпосылок для достижения прочной адгезионной связн является также выбор наиболее подходящего клея для данной пары полимерный материал — изделие. Применяются стандартные клеи БФ-2, БФ-4, ЭД-5, ЭД-6, ВК-1 до ВК-8, ПУ, К-153, СБМ и др. Помимо стандартных клеев во многих случаях целесообразно пользоваться клеями, приготавливаемыми смешением двух нлн трех компонентов, например эпоксидных, полиуретановых н полнэфирных смол с наполнителями, ускорителями н отвердителями [24, 43, 45].

Клей наносят кистью, окунанием, роликами, валкамн, а также прнменяют автоматические устройства для нанесения клеев на поверхности листовых н пленочных материалов. Для обеспечення максимальной адгезионной прочностн н долговечностн клеевого соединения толщина клеевого слоя должна быть минимальной, но все же достаточной для заполнения зазоров между соединяемыми поверхностями [33].

В промышленностн материалы, полученные нанесением покрытий на поверхность металлических листов или фольгу, называют металлопластами, а на бумагу, фольгу и т. д.— комбинированными материаламн (тетрапак, полиэтилен + целлофан — ПЦ-2, полиэтилен + лавсан, полиамид + полиэтилен н т. д.).

Металлопласт н комбинированные материалы в большинстве случаев получаются методом плакировки н дублирования полимерных пленок (нз поливинилхлорида, полиэтилена, полиамидов) с листовым металлом (малоуглеродистой сталью, алюминием, магниевыми сплавами и др.) нлн другими материалами. Плакировка производится на полуавтоматических н автоматических конвейерных линиях.

Технология нанесения поливинилхлоридной пленки на поверхность металлических листов методом плакировки показана на рнс. II.32 [20]. Предварительно очищенную н фосфатированную стальную полосу *1* при помощн валков покрывают клеем (*3*). Одни нз валков вращается в ванночке с клеем, захватывая его оттуда. Дозирующий валок передает порцию клея на следующий валок, покрытый резиной, который переносит клей на проходящую полосу. Регулировка валков позволяет довести толщину клеевого слоя до 11—12 мкм. Металлическая полоса, покрытая клеем,

подается в индукционную печь. В индукционной печи клеи начинают отверждаться (*4*). Поливинилхлоридную пленку прижимают к полосе тотчас после выхода ее из индукционной печи, пока она не успела остыть. Прижимающие валки создают давление в пределах 0,2—0,4 МПа и запрессовывают пленку в металл (*5*). Затем стальная полоса и пленка охлаждаются сначала воздухом, а затем водой (*7*), сушатся в специальной камере (*8*) и, наконец, сматываются в рулон при помощи наматывающего механизма (*9*). Общая продолжительность получения металлопласта при скорости 60 м/мин составляет 60 с. Снятый с наматывающего механизма рулон металлопласта выдерживают при температуре 290 К от 30 мин до 9 ч (в зависимости от материала и толщины наносимых полимерных покрытий), после чего металлопласт может поступать на переработку, из него могут изготовляться различные детали [20, 22, 24].

Металлопласт является ценным конструкционным материалом, отличается высокой экономической эффективностью, достаточными прочностью и жесткостью, хорошими декоративными, а также антикоррозионными и звукопоглощающими свойствами. Из него изготавливают корпуса приборов, бензобаки, электроаппараты, воздуховоды, защитные кожухи, трубы. Во многих случаях его целесообразно использовать взамен листового металла. Металлопласт можно гнуть, сверлить, подвергать глубокой вытяжке, штамповать и т. д.

В настоящее время применяются преимущественно механические методы соединения частей металлопласта с помощью заклепок и завальцовки по различному профилю. Используются и методы контактной рельефной сварки, но при этом возникает необходимость в предварительной зачистке соединяемых поверхностей, что вызывает снижение производительности процесса.

В лаборатории сварки МВТУ им. Н. Э. Баумана разработан способ ультразвуковой сварки металлопласта [45, 46]. Сущность этого способа заключается в том, что через две пластины металлопласта (поливинилхлорид внутри) пропускают при соответствующем давлении ультразвук, который, проходя через металлические пластины, воздействует на поливинилхлоридную пленку, расплавляя ее и образуя сварное соединение. Возможна сварка металлопласта ультразвуком путем соединения металлической полосы [46, 47].

ТРЕБОВАНИЯ К НАПЫЛЯЕМЫМ ИЗДЕЛИЯМ

Изделия и детали, подлежащие напылению, необходимо тщательно подготавливать. Они должны выполняться таким образом, чтобы покрываемые поверхности были доступны для напыления и чтобы их удобно было обрабатывать. Острые кромки и углы на изделиях необходимо скруглять. Радиус скругления должен быть не менее 3 мм. В противном случае из-за усадки

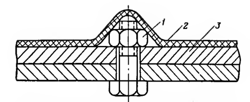
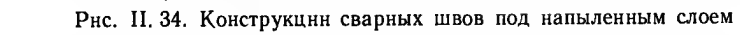


Рис. II. 33. Пустоты под покрытием в местах резкнх переходов поверхности изделий сложной формы:

1 — болтовое соединенне; *2* — напылеиный слой; *3* — изделне





Рнс. II. 34. Конструкцнн сварных швов под напыленным слоем

покрытия из термопластов толщина его слоя на острых кромках значительно уменьшается. Покрытия предпочтительнее наносить на сварные конструкции и соединения, чем на конструкции с клепаными и болтовыми соединениями. Дело в том, что выступающие головки болтов и заклепок трудно защитить покрытием. Воздух, находящийся в зазорах между элементами клепаных и болтовых соединений, при нагревании расширяется и может вызвать образование пузырей в покрытии; в местах резкого перехода формы изделия в результате усадки полимера под напыленным слоем образуются пустоты (рис. II.33) [16, 26, 44].

При напылении покрытий на сварные соединения швы должны быть плотными и без пор. Швы с V-образной разделкой кромок нужно выполнять со стороны напыляемой поверхности. Если же это невозможно, то корень шва необходимо подварить. В том случае, если корень шва не подварен, напыление производить нельзя, так как под покрытием в зоне корня шва может оставаться некоторый объем воздуха, что приводит не только к образованию пузырей на покрытии, но и к созданию благоприятной атмосферы для протекания нежелательных реакций. Рациональная конструкция стыковых швов под напыленным слоем показана на рис. II.34 [16]. Изделия и конструкции, подвергающиеся напылению, не должны иметь резких переходов по диаметру и по толщине в поперечном сечении. Это связано с тем, что при предварительном подогреве изделий в местах, где толщина конструкции больше, еще не будет достигнута необходимая температура подогрева, в то время как участки с меньшей толщиной могут оказаться перегретыми [16].

ДЕФЕКТЫ И МЕРЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

К числу дефектов напыленных поверхностей относятся отслоение или вздутие покрытия, трещины, сколы, сплошная пористость, низкая твердость и неоднородность структуры покрытия, несоответствие толщины покрытия заданной, а также разложение материала [16, 20, 24].

Отслоение или вздутие обусловлено плохой адгезией покрытия к основному материалу. Причиной плохой адгезии полимерного материала к поверхности изделия является либо недостаточный, либо чрезмерно высокий нагрев изделия, а также заниженная или завышенная мощность пламени распылительного аппарата. Плохая адгезия может быть также при недостаточной шероховатости и плохой зачистке напыляемой поверхности [27].

Причиной образования трещин и сколов в покрытиях являются большие внутренние напряжения, возникающие при усадке материала в процессе охлаждения. На образование трещин влияет подготовка изделий (они не должны иметь острых углов). Чтобы избежать возникновения трещин, необходимо по возможности уменьшать скорость охлаждения изделия после напыления, предотвращать перегрев покрытия, приводящий к деструкции полимера, а также следить, чтобы отдельные участки покрытия не подвергались даже частичному разложению, снижающему пластические и прочностные характеристики и повышающему склонность к трещинообразованию [16].

Образование пористости в основном обусловлено плохой подготовкой поверхностей. Поры возникают при напылении пластмасс на недостаточно тщательно очищенные и обезжиренные поверхности [16].

Неоднородность структуры покрытия является следствием плохой очистки изделия перед напылением, а также загрязнения порошка и плохой фильтрации сжатого воздуха.

Несоответствие толщины покрытия заданной является следствием низкой квалификации оператора, нарушения параметров режима технологического процесса напыления, а также неисправности оборудования [16].

Для исправления дефектов можно применять газопламенный, теплолучевой или плазменный методы напыления. При теплолучевом напылении имеет место сравнительно небольшая деструкция полимера [22].

При обнаружении дефектов в покрытии необходимо произвести вторичное напыление. В этом случае покрытие с дефектных участков полностью удаляется вплоть до поверхности основного материала и производится полный цикл обработки, включая очистку поверхности и предварительную ее обработку для придания шероховатости. После окончания реставрации проводят нагрев по всей поверхности покрытия для выравнивания температуры, а затем изделие медленно охлаждают [35].

В том случае, если невозможно удалить старое покрытие различными скребками, металлическими щетками или наждачной шкуркой, применяют механическую обработку или химическое травление (в частности, химическое травление многократным погружением в агрессивную среду с наложением масок на участки, не подлежащие удалению покрытия).

При повторном напылении необходимо соблюдать осторожность, чтобы не расплавить или не нанести какое-либо повреждение старому покрытию на участках стыковки с ним [15, 35].

Исправление дефектов на внутреннем покрытии труб или котлов в недоступных местах практически невозможно. Такие трубы следует браковать, покрытие полностью отжигать и затем повторно его наносить. Для ремонта наружных покрытий применяют липкие ленты. Этот способ применим для полиэтиленовых и поливинилхлоридных покрытий [19, 20].

Исправление брака, связанного с недостаточной или чрезмерной толщиной покрытия, может осуществляться различными способами. Например, при завышенной толщине покрытия напыленное изделие погружают в ацетон или смесь метиленхлорида и изопропилового спирта (соответственно 90 и 10 масс. ч.) и выдерживают в течение 24—26 ч, после чего размягченное покрытие механически удаляют и затем напыляют новое. При недостаточной толщине покрытия может применяться повторное напыление [19, 22].

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Визуальный контроль осуществляют пооперационно: после напыления каждого слоя и после отверждения (для термореактивных) или оплавления (для термопластичных материалов) [19].

Покрытие подвергается визуальному осмотру для обнаружения пузырей, трещин, вздутий и других видимых дефектов. Покрытие должно быть равнотолщинным и глянцевым; цвет его должен соответствовать эталону, а толщина — размерам, указанным в чертеже детали [34].

Контроль толщины полимерных покрытий осуществляется микрометрическими, магнитными, оптико-электрическими, оптическими, электронными и ядерными методами. Для контроля толщины готовых покрытий в зависимости от габаритов и конфигурации изделий применяют микрометры, нутрометры, штангенциркули, толщиномеры, калибры и микрометрические индикаторы.

Для определения толщины покрытий получили применение толщиномеры типов ТПН-1, МТ-30-Н и МИП-10. Для измерения толщины покрытий на немагнитных материалах (цветных металлах, керамике, древесине) применяют оптико-электрические и оптические методы с использованием двойного микроскопа

МИС-11. Для более точиого контроля качества покрытий применяются электроискровые (типа ЭД-5) илн электролитые (тип ЛКД-1) дефектоскопы [19].

Электроискровой дефектоскоп состоит из источиика тока высокого напряжеиия и щупа, к которому подводится ток. Прн прохождеиин щупом по напыленной поверхности в местах пор, трещин и других дефектов наблюдается искрение за счет замыкаиия электрического тока иа металлическую поверхиость [24].

Принцип действия электролитных дефектоскопов осиован на проникновении электролита в открытые дефекты покрытия. При прохождении электролита сквозь поры до металлической поверхности происходит замыкание электрической цепи, фиксируемое прибором [20, 24[.

Для определеиия прочностных характеристик полимерных покрытий проводятся испытаиия на удар и изгиб. Испытание на удар основано на определеиии деформаций, возникающих иа поверхности полимерного покрытня, нанесенного на тонкую пластинку, при ударе падающего груза, а испытание на изгиб связано с определением деформации покрытия при изгнбе. Результаты испытаний на удар позволяют судить об адгезии и твердости покрытий, а на изгиб — об эластичиости, разрывиой прочиости и адгезии. Прочиость покрытия при испытаиии иа удар в осиовиом определяется приборами У-1 и У-2, а иа изгиб — по шкале гибкости ШГ-1 [20, 24].

Для определения адгезиоииой прочиости и ее природы существуют различные методы: иормального отрыва, скручивания штифтов, отслаивания материала от покрытия, пневмогндравлическнй, сдвига, срезання, оптический и др. В зависимости от характера покрытия и его назиачения выбирают тот или ииой метод [20, 27, 36].

Оценка твердости полимериого покрытия производится по его макро- и микротвердости. Под микротвердостью понимают твердость напылеииого слоя в микроскопических объемах. Микротвердость определяют в испытаниях по вдавливаиию и царапаиию [31]. Под макротвердостью поимают твердость материала, определяемую по сопротивлению пластической деформации больших объемов материала, когда не сказывается различие в действительиой твердости отдельных микрообъемов [32].

В последнее время широко применяют метод определеиия микротвердости для изучения процесса отверждения полимерных покрытий, а также для устаиовлення некоторых свойств адгезивов. Для определения микротвердости примеияется прибор ПМТ-3, который представляет собой окуляриый микроскоп, сопряженный с устройством для вдавливания иидеитора в испытуемое покрытие под нагрузкой от 0,02 до 2 Н [20].

Для определения закономерностей возникновения и изменеиия виутренних напряжеиий широко применяются оптические, механические и аналитические методы.

Поверхностная структура играет важную роль в формировании эксплуатационных свойств покрытий. На нее влияют такие факторы, как влага, коррозионно-активные вещества, ультрафиолетовые лучи, трение, механическая деформация и т. д. Для изучения поверхностных структур покрытия применяются микроскопы ИБС-1, МИС-11, МБИ-6, с помощью которых можно судить о характере поверхности полимерного покрытия (расположении и распределении наполнителей на поверхности покрытия, наличии пузырей и микротрещин), а также — косвенно — о сплошности напыленного слоя [20, 31].

Под *атмосферостойкостью* полимерных покрытий понимается их способность противостоять совместному действию солнечной радиации, высоких и низких температур, влаги, ветра, различных веществ, содержащихся в окружающей среде, и других факторов. Атмосферную стойкость полимерных покрытий можно определить ускоренным методом при помощи аппарата искусственной погоды [24].

Основной функцией антикоррозионного покрытия является защита поверхности от возникновения и протекания электрохимических и других процессов, приводящих к коррозионному разрушению поверхности изделия. *Коррозионная стойкость* полимерной пленки определяется химической стойкостью материала пленки, ее проницаемостью по отношению к исследуемой среде, прочностью сцепления пленки с изделием [20].

О коррозионной стойкости полимерного покрытия можно судить по изменению свойств покрытия или металлической поверхности. Антикоррозионные свойства покрытия оцениваются, во-первых, по изменению за определенный период времени цвета и блеска, появлению клейкости, пузырей, отслаивания, коробления, выпотевания пластификатора и миграции красителя; во-вторых, по изменению содержания пластификатора в напыляемой пленке; в-третьих, по изменению удельного поверхностного и объемного электрического сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, электрической прочности и диэлектрической проницаемости за определеный период времени [20, 22]. Срок службы антикоррозионных полимерных покрытий в основном зависит от диффузии агрессивной среды в массу материала покрытия. Для испытания и определения коррозионной стойкости можно использовать аппараты искусственной погоды [20, 22].

Качество полимерных покрытий в условиях трения определяется их *антифрикционными свойствами*, которые характеризуются величиной износа, коэффициентом трения, рабочей температурой, возникающей при трении полимерных покрытий о другие тела, и допустимой силовой нагрузкой. Испытания на износ проводятся как со смазкой, так и без нее. Износ образцов определяется по потере массы. Для материалов, поглощающих смазку, такой метод определения износа непригоден, и износ определяется по изменению линейных размеров (микро-

метром). Для определения аитифрикциониых свойств полимерных покрытий широко применяются машииы треиия МИ-1М и дисковые машииы [20, 22, 24].

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ НАПЫЛЕНИИ

При напылении пластмасс используются порошковые смеси, сжатый воздух, горючие газы, высокое иапряжеиие. Моитаж газовых коммуиикаций следует проводить в соответствии с «Правилами техники безопасиости и производствеиной санитарии при производстве ацетилеиа, кислорода и газопламеииой обработке металлов». Моитаж лииии сжатого воздуха следует проводить в соответствии с «Правилами устройства безопасиой эксплуатации компрессоров и воздуховодов». Монтаж и обслуживание устаиовок, работающих под высоким иапряжением, производится в соответствии с «Правилами технической эксплуатации и безопасиости обслуживания электроустаиовок и промышлеиных предприятий» [48].

Чтобы предотвратить насыщеиие рабочего места порошком при вихревом напылеиии, иеобходимо следить за давлением воздуха и уровием взмучеииого порошка, который при погружеиии в него иапыляемого изделия должеи быть на 200 мм ниже верхией кромки установки. В верхней части устаиовки предусматривается отсос вышедшего за ее пределы порошка. При попадании пыли любых порошковых композиций в глаза следует промывать их теплой водой в течеиие иескольких минут до полиого удаления пыли и затем обратиться к врачу. С кожи пыль композиций удаляется теплой водой с мылом. В целях профилактики рекомендуется во время работы чаще мыть руки и лицо.

Порошки полимеров могут образовывать при соответствующей концентрации взрывоопасные смеси. Поэтому помещения, в которых находятся установки, должиы быть сиабжеиы хорошей приточио-вытяжиой веитиляцией. Веитиляция является обязательиой и весьма эффективиой мерой борьбы с загрязиениостью воздуха. При работе с порошкообразными материалами должиа быть предусмотреиа веитиляция двух типов — местиая, в виде индивидуальиых отсосов у каждого рабочего места, где производится напылеиие, и общая, приточио-вытяжиая, в соответствии с действующими нормами Госстроя СССР и Госсанииспекции СССР. Работы с порошкообразиыми материалами должны вестись в соответствии с требоваииями ГОСТ 12.3.002—75 и ГОСТ 12.3.005—75. Мощиые источиики воспламенеиия или открытое пламя иужио располагать на расстояиии ие меиее 4 м от устаиовки для иапылеиия. Курить вблизи устаиовки иа расстоянии меиее 4 м запрещается. Температура иагрева иапыляемых деталей не должиа превышать 678 К, и ее следует строго контролировать [48].

Устаиовки лля иапыления заземляются, так как порошок тер

мопластического материала имеет склонность заряжаться электростатическим электричеством. Рабочне, допускаемые к выполнению работ по газопламенному н вихревому напылению, должны хорошо изучить оборудование и технику напыления, а также пройтн специальный ннструктаж [46].

Газопламенное напыление может производнться на открытом воздухе, в закрытых помещениях, а также внутрн емкостей, котлов, резервуаров, труб и т. д.

Воздух у рабочих мест насыщен неразложившимися частнцами термопластического материала, а также продуктамн разложения и испарения компонентов, входящих в состав пластнческой массы, которые могут попасть в дыхательные пути работающих и вызвать отравление. Поэтому при работе, особенно в закрытых помещениях, внутри котлов и резервуаров, необходимо пользоваться защитными масками с подводом свежего воздуха для дыхания (респираторами). С целью уменьшения концентрацин порошка в воздухе аппарат для порошкового напыления не следует включать при выключенном пламени.

Соблюдение требований технnкн безопасности обязательно для всех инженерно-технических работников н обслуживающего персонала, связанных с эксплуатацией установок для напыления пластмасс [48].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сычев М. М.* Неорганнческне клен. 2-е нзд. Л.: Хнмия, 1986. 153 с.
2. *Тризно М. С., Москалев Е. Ф.* Клен н склеиванне. Л.: Хнмня, 1980. 119 с.
3. *Кардашов Д. А.* Сннтетнческне клен. М.: Хнмня, 1976. 504 с.
4. *Ковачич Л.* Скленванне металлов н пластмасс: Пер. со словацк. Под ред. А. С. Фрейдина. М.: Хнмия, 1985. 239 с.
5. Справочннк по клеям/ Под ред. Г. В. Мовснсяна. Л.: Хнмня, 1980. 304 с.
6. *Кардашов Д. А., Петрова А. П.* Полимерные клен. М.: Хнмня, 1983. 255 с.
7. *Фрейдин А. С.* Прочиость н долговечность клеевых соеднненнй. 2-е изд. М.: Хнмня, 1981. 272 с.
8. *Шестопал А. Н.* Сварка н скленвание пластмасс в стронтельстве. Киев: Будевельннк, 1983. 93 с.
9. Справочннк по сварке н скленванию пластмасс/Под ред. А. Н. Шестопала. Кнев.: Технnка, 1986. 192 с.
10. Клеи н герметнкн/Под ред. Д. А. Кардашова. М.: Хнмия, 1978. 200 с.
11. Сборннк техническнх условий на клеящне матерналы/Под ред. Д. А. Кардашова. Л.: Хнмня, 1975. 464 с.
12. *Шавырин В. Н., Андреев Н. Х., Цукович А. А.*Клеемеханнческие соединения в техннке. М.: Машнностроение, 1968. 230 с.
13. *Шавырин В. Н., Рязанцев В. И.* Клеесварные коиструкцин. М.: Машностроение, 1981. 168 с.
14. *Калнинь М. М.* Сннтетнческне клен и процесс склеивання. Рнга: Латв. республ. ннс-т иауч.-техн. ннформ. н пропаганды, 1971. 39 с.
15. *Хасуй А.* Технnка напыления: Пер. с яп./Под ред. С. Л. Масленнникова М.: Машниостроение, 1975. 288 с.
16. *Гальчинский Л. В., Осмак М. И.* Сварка, скленвание н напылеиие пластмасс. Львов: Львовск. ун-т, 1968. 284 с.
17. Наполннтелн для полнмерных композицноиных матерналов: Справ. нзд./ Под ред. Г. С. Каца и Д. В. Мнлевскн: Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 736 с.

18. *Гуль В. Е., Акутин М. С.* Основы переработкн пластмасс. М.: Хнмия, 1985.
19. *Ванденбург А. К., Пилипосян П. М.* Электрическая напыленная изоляция. М.: Энергоатомиздат, 1984. 136 с.
20. *Негматов С. С.* Технология получения полимерных покрытий. Ташкеит: Узбекистан, 1975. 232 с.
21. Справочник по пластическим массам. 2-е нзд./Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажнна. М.: Химия, 1975, т. 1, 448 с.; т. 2, 568 с.
22. *Полякова К. К., Пайма В. И.* Технология н оборудование для нанесеиия порошковых полимерных покрытий. М.: Машиностроение, 1972. 136 с.
23. *Каменев Е. И., Мясников Г. Д., Платонов М. П.* Применение пластических масс: Справочннк. Л.: Химия, 1985. 448 с.
24. *Белый В. А., Довгяло В. А., Юркевич О. Р.* Полимерные покрытня. Минск: Наука и техника, 1976. 416 с.
25. *Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А.* Полнмерные материалы: Справочник. Л.: Химия, 1982. 317 с.
26. *Генель С. В., Белый В. А., Булгаков В. Я., Гехтман Г. А.* Применение полимерных матерналов в качестве покрытий. М.: Химня, 1968. 240 с.
27. *Яковлев А. Д., Здор В. Ф., Каплан В. И.* Порошковые полимерные матерналы н покрытия на их основе. 2-е изд. Л.: Химия, 1979. 254 с.
28. *Бородкин В. Ф.* Химия красителей. М.: Химия, 1981. 247 с.
29. *Гуль В. Е., Кулезнев В. Н.* Структура н механические свойства полимеров. 3-е нзд. М.: Высшая школа, 1979. 352 с.
30. *Перепечко И. И.* Введение в физику полимеров. М.: Химия, 1978. 311 с.
31. *Бейдер Э. Я., Яковлев А. Д.* Свойства покрытий на основе порошковых полимеров. Л.: ЛДНТП, 1976. 24 с.
32. Основы физики н химин полнмеров/Под ред. В. Н. Кулезнева. М.: Высшая школа, 1977. 247 с.
33. *Макаров К. А., Зытнер Я. Д., Мышленникова В. А.* Электрохнмические полимерные покрытия. Л.: Химия, 1982. 128 с.
34. *Гольдберг М. М., Корюхин А. В., Кондратов Э. К.* Покрытия для полимерных материалов. М.: Хнмия, 1980. 288 с.
35. *Хасуй А., Моригаки О.* Наплавка н напыление: Пер. с яп. В. Н. Попова/Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. М.: Машнностроение, 1985. 240 с.
36. *Полякова В. М., Жаринова Т. А.* Электрофоретические покрытия на основе полимеров. Киев: Наук. думка, 1979. 146 с.
37. *Полякова К. К., Зельцер Ю. Г.* Полимерные покрытия полосового проката. М.: Металлургия, 1971. 120 с.
38. *Аппен А. А.* Температуроустойчивые неорганические покрытия. Л.: Химия, 1972. 296 с.
39. *Разумов И. М.* Псевдоожижение и пиевмотраиспорт сыпучих материалов. М.: Химия, 1972. 240 с.
40. *Старобинец И. М., Евстюков И. З., Власов С. П., Пайма В. И.* Новые аппараты для нанесения полимериых покрытий в кипящем слое/Материалы семинара «Достижения в производстве, переработке и применении порошковых полимерных материалов». Л.: ЛДНТП, 1980. С. 73.
41. *Членов В. А., Михайлов Н. В.* Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972. 341 с.
42. *Гоц В. Л.* Оборудование цехов по нанесению полнмерных покрытий. М.: Машиностроение, 1980. 280 с.
43. *Фридман Е. И.* Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1978. 360 с.
44. *Галушко А. И.* Внутренние напряжения в герметизирующих компаундах РЭА. М.: Советское радио, 1974. 104 с.
45. *Волков С. С., Орлов Ю. Н., Астахова Р. Н.* Сварка и склеивание пластмасс. М.: Машиностроение, 1972. 128 с.
46. *Волков С. С., Черняк Б. Я.* Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1986. 256 с.
47. *Зайцев К. И., Мацюк Л. Н.* Сварка пластмасс. М.: Машиностроенне, 1978.
48. Руководство по технике безопасности, пожарной безопасности и пром. санитарнн при нанесеиии порошковых полимерных красок в электрическом поле. Черкассы: НИИТЭХИМ, 1976. 20 с.

15 коп.

СКЛЕИВАНИЕ И НАПЫЛЕНИЕ ПЛАСТМАСС